Universidade do Minho
Escola de Engenharia

José Manuel Tavares Vieira Cabral

Uma Arquitectura para Adaptação de Tráfego de Baixo Débito em Aplicações de Controlo

Tese submetida à Universidade do Minho para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Electrónica Industrial

Trabalho efectuado sob a orientação de

Professor Doutor Joaquim José dos Santos E. Neves
Departamento de Electrónica Industrial da Escola de Engenharia da Universidade do Minho

Professor Doutor José António Ruela Simões Fernandes
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Abril de 2005

Resumo

Esta tese descreve o trabalho de investigação efectuado sobre a adaptação de tráfego de baixo débito em aplicações de controlo, e inclui a proposta e análise de uma arquitectura de um sistema que integra Adaptadores de terminal e um Concentrador interligados, através de uma rede de comunicação, a uma Aplicação de controlo.

O tráfego gerado em redes de sensores e actuadores, sistemas de controlo distribuído ou por sistemas de aquisição de dados tem sido habitualmente suportado em redes específicas, como os vulgarmente designados Barramentos de Campo, de que são exemplos o CAN e o PROFIBUS. Estas tecnologias apresentam bastantes limitações, principalmente em aspectos relacionados com a integração de serviços e sistemas, largura de banda e área abrangida. Por outro lado, a adaptação de serviços de muito baixo débito em redes de comunicação tem subjacente o controlo do atraso no preenchimento dos pacotes e o respectivo escalonamento, aspectos que têm um impacto significativo na Qualidade de Serviço.

Para a resolução destes problemas foi proposta e especificada uma arquitectura modular de um sistema que permite multiplexar vários fluxos de informação, gerados por serviços de muito baixo débito, num único fluxo agregado. Foi seleccionada para o efeito a tecnologia ATM, pelas propriedades que apresenta no que se refere à eficiência de multiplexagem e ao controlo do atraso de empacotamento.

Para efectuar a agregação de tráfego foram desenvolvidos Algoritmos de escalonamento temporal para o Adaptador de terminal e Concentrador, de forma a satisfazer dois objectivos principais: garantir o cumprimento do atraso de serviços com restrições temporais e aumentar a eficiência de transmissão na rede.

A análise de desempenho foi baseada num sistema simplificado, implementado por um conjunto de programas em linguagem C que permitiram avaliar, duma forma objectiva, os Algoritmos de escalonamento de tráfego propostos.

Os resultados obtidos evidenciam um desempenho do sistema compatível com os requisitos da grande maioria das aplicações de controlo. Foi ainda possível identificar um conjunto de temas passíveis de desenvolvimento em trabalhos futuros, que incluem a especificação final e construção de um sistema baseado na arquitectura proposta.

- ***Palavras Chave***

AAL, Adaptador de terminal, Aquisição de dados, ATM, Barramento de Campo, Concentrador, Controlo, Escalonamento, Integração de serviços, Protocolo, Qualidade de Serviço.

Abstract

This thesis describes the research work carried out for adapting low bit rate traffic in control applications. It includes the proposal and analysis of a system's architecture that integrates Terminal adapters and a Concentrator interconnected, through a communication network, to a Control Application.

The traffic generated in sensor and actuator networks, distributed control or data acquisition systems has been supported in specific networks, commonly called Fieldbuses. Examples of Fieldbus technologies are CAN and PROFIBUS. These technologies present many limitations, particularly in aspects related with the integration of services and systems, bandwidth and covered area. On the other hand, adapting services of low bit rate traffic in communication networks is concomitant with the control of delay in fulfilling and scheduling the packets: these aspects have a significant impact in the Quality of Service

For the resolution of these problems a modular architecture of a system was proposed and specified that allows multiplexing several information flows, generated by services of low bit rate traffic, in one sole added flow. For this effect, the ATM technology was selected for the properties it presents related with the multiplexing efficiency and the control of packetization delay.

To perform traffic aggregation, Scheduling Algorithms for the Terminal Adapter and Concentrator have been developed in order to satisfy two main goals: to guarantee commitment delay for the services, with time restrictions, and to increase the network transmission efficiency.

The performance analysis was based on a simplified system; implemented by a set of programs in C language that allows the evaluation, in an objective way, of the proposed traffic Scheduling algorithms.

The results obtained show a system performance compatible with the requirements of the great majority of control applications. It was still possible to identify a set of subjects of possible developments in future works that include the final specification and implementation of a system based on the proposed architecture.

- ***Keywords***

AAL, ATM, Concentrator, Control, Data acquisition, Fieldbus, Protocol, Quality of Service, Service integration, Terminal adapter, Scheduling.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço aos meus orientadores, Professor Doutor Joaquim Neves e Professor Doutor José Ruela Fernandes, toda a disponibilidade e colaboração prestadas durante a realização desta tese.

Em segundo lugar, gostaria de destacar o papel importante do meu colega Gerardo Rocha no apoio prestado ao longo do desenvolvimento do trabalho e nas inúmeras trocas de ideias que em muito contribuíram para a sua realização.

Agradeço ao Departamento de Electrónica Industrial da Universidade do Minho, todas as condições e facilidades proporcionadas para a realização desta tese. Em especial, gostaria de destacar o Professor Carlos Couto pelo seu apoio e incentivos prestados em fases difíceis deste trabalho.

Gostaria também de expressar o meu agradecimento ao INESC Porto por todas as facilidades concedidas, em especial no arranque deste trabalho.

Não posso também deixar de expressar o meu reconhecimento a todas as pessoas que de alguma forma tornaram possível a realização desta tese, principalmente aquelas com quem mais convivi e que me ajudaram nas fases mais difíceis, entre as quais gostaria de destacar a Graça Minas, o Manuel João Ferreira, o Paulo Ferreira, o João Neves e o Cassien Croisé.

Finalmente, é de referir que este trabalho foi suportado por uma bolsa do PROADEP com a referência 5.3/N/189.007/00.

Aos meus pais

Conteúdo

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Acrónimos

AAL	ATM Adaptation Layer
AAU	ATM User to ATM User Indication
ABR	Available Bit Rate
ABT	ATM Block Transfer
ANSI	American National Standards Institute
ATC	ATM Transfer Capability
ATD	Asynchronous Time Division
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BCE	Base Communication Equipment
B-NT1	Broadband Network Termination 1
B-NT2	Broadband Network Termination 2
BOM	Beginning Of Message
BSC	Base Station Controller
BSS	Base Station Subsystem
B-TA	Broadband Terminal Adapter
B-TE1	Broadband Terminal Equipment 1
BTS	Base Transceiver Station
CAN	Controller Area Network
CBR	Constant Bit Rate
CCITT	Comité Consultative International de Téléphone et Télégraphe
CDMA	Code Division Multiple Access
CDV	Cell Delay Variation
CEPT	Conference European Post and Telegraph
CES	Circuit Emulation Service
CLP	Cell Loss Priority
CLR	Cell Loss Ratio
CN	Core Network
CNET	Centre National d'Etudes des Telecommunications
COM	Continuation Of Message
CPCS	Common Part Convergence Sublayer
CRC	Cyclic Redundancy Code
CS	Convergence Sublayer
CSDN	Circuit Switched Digital Network

CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access – Collision Avoidance
CSMA-CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CT	Controlled Transfer
CTD	Cell Transfer Delay
DBR	Deterministic Bit Rate
DCCS	Distributed Computer–Controlled Systems
EDD	Earliest Due Date
EDF	Earliest Deadline First
EOM	End Of Message
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCC	Federal Communications Commission
FCFS	First Come First Served
FDDI	Fiber Distributed Data Interface
FEC	Forward Error Correction
FFQ	Fluid Fair Queuing
FIFO	First-In-First-Out
FIP	Factory Instrumentation Protocol
FPS	Fast Packet Switching
GFC	Generic Flow Control
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GPS	Generalized Processor Sharing
GSM	Global System for Mobile Communications
HEC	Header Error Control
HLR	Home Location Register
HTML	Hypertext Markup Language
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute for Electrical and Electronics Engineers
IFG	Inter Frame Gap
IMT-2000	International Mobile Telecommunications 2000
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ISO	International Standards Institute
IT	Information Type
ITU-T	International Telecommunication Unit - Telecommunication Standardization Sector
IWF	Interworking Function

LAN	Local Area Network
LI	Length Indicator
LSB	Least Significant Bit
MA	Medium Adapter
MAC	Medium Access Control
MAN	Metropolitan Area Network
MAP/TOP	Manufacturing Automation Protocol / Technical Office Protocol
MCR	Minimum Cell Rate
MID	Message Identifier
MMS	Manufacturing Message Specification
Modem	Modulator / Demodulator
MS	Mobile Station
MSB	Most Significant Bit
MSC	Mobile service Switching Center
NNI	Network Node Interface
NNTP	Network News Transport Protocol
OAM	Operation and Maintenance
OMC	Operation and Maintenance Center
OSI	Open Systems Interconnection
PABX	Private Automatic Branch Exchange
PAD	Padding
PAN	Personal Area Network
PC	Personal Computer
PCF	Point Coordination Function
PCM	Pulse Coded Modulation
PCR	Peak Cell Rate
PCS	Personal Communications Service
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
PDU	Protocol Data Unit
PDV	Packet Delay Variation
PL	Physical Layer
PLC	Programmable Logic Controller
PLMN	Public Land Mobile Network
PM	Physical Medium
P-NET	Process Network
POH	Path Overhead
PRM	Protocol Reference Model

PROFIBUS	Process FieldBus
PSTN	Public Switched Telephone Network
PT	Payload Type
QoS	Quality of Service
RACE	Research in Advanced Communications in Europe
RDI	Rede Digital Integrada
RDIS	Rede Digital com Integração de Serviços
RLP	Received Loss Priority
SAP	Service Access Point
SAR	Segmentation and Reassembly Sublayer
SBR	Statistical Bit Rate
SCR	Sustainable Cell Rate
SDL	Specification and Description Language
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SDU	Service Data Unit
SGSN	Serving GPRS Support Node
SIM	Subscriber Identity Module
SMS	Short Message Service
SN	Sequence Number
SNP	Sequence Number Protection
SOH	Section Overhead
SONET	Synchronous Optical Network
SPC	Stored Program Control
SS	Spread Spectrum
SSCS	Service Specific Convergence Sublayer
SSS	Switching Subsystem
ST	Segment Type
STF	Start Field
STM	Synchronous Transfer Mode
STM-N	Synchronous Transport Module - Level N
STS-N	Synchronous Transport Signal - Level N
TC	Transmission Convergence
TCE	Transcoding Equipment
TCP	Transport Control Protocol
TDM	Time Division Multiplexing
TE2	Terminal Equipment 2
UBR	Unspecified Bit Rate

UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telephony System
UNI	User to Network Interface
USB	Universal Serial Bus
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VBR	Variable Bit Rate
VC	Virtual Channel
VC-4	Virtual Container Type-4
VCI	Virtual Channel Identifier
VLR	Visitor Location Register
VP	Virtual Path
VPI	Virtual Path Identifier
WAP	Wireless Application Protocol
W-CDMA	Wideband – Code Division Multiple Access
WFQ	Weighted Fair Queuing
WLAN	Wireless Local Area Network
WRR	Weighted Round-Robin
WWW	World Wide Web

1

Introdução

A evolução tecnológica ao nível da micro-electrónica tem conduzido ao aparecimento de novos dispositivos (e.g. sensores, actuadores, sistemas de aquisição de dados) a preços bastante reduzidos. Como consequência, o número de aplicações de controlo distribuído, que envolvem a interligação de uma grande variedade de equipamentos, tem vindo a crescer em áreas como a agro-pecuária, a domótica, o controlo industrial e a indústria automóvel.

Os sensores são dispositivos que geram um sinal eléctrico em resposta a um estímulo físico. Os sistemas sensoriais constituem uma área tecnológica interdisciplinar que combina as áreas da física, da química, dos materiais avançados e da biologia molecular com a electrónica e o processamento de sinal. Num futuro próximo, prevê-se que as tecnologias sensoriais irão desempenhar um papel preponderante na economia, no ambiente, na agricultura e na pecuária.

A interligação destes equipamentos pode ser caracterizada, em geral, por apresentar fluxos de baixo débito e por exigir à rede baixos atrasos de transmissão. Devido a estas características, este tipo de tráfego é, por vezes, suportado por redes específicas tais como os vulgarmente designados Barramentos de Campo, de que são exemplos o CAN (CAN, *Controller Area Network*) e o PROFIBUS (PROFIBUS, *Process FieldBus*). Estas tecnologias possuem bastantes limitações, principalmente em aspectos relacionados com a integração de serviços e sistemas, largura de banda e área abrangida.

As actuais redes de comunicação foram, em geral, optimizadas para o suporte de serviços específicos, tendo sido algumas adaptadas para suportar outro tipo de serviços. A tendência actual para uma maior integração de serviços, pressupõe um conceito fundamental para atingir esse objectivo: a Qualidade de Serviço (QoS, *Quality of Service*). A especificação e medição da

QoS são problemas complexos, quer do ponto de vista do utilizador quer do ponto de vista da rede. O utilizador deverá adaptar os requisitos das suas aplicações aos níveis de desempenho oferecidos pela rede, enquanto que a rede deverá garantir ao utilizador a plena satisfação dos parâmetros de QoS estabelecidos no início das sessões, ou renegociados posteriormente, de forma a ser possível o correcto desempenho das aplicações suportadas.

1.1 Caracterização do problema e cenários de aplicação

Actualmente é já possível observar aplicações baseadas em computador a serem aplicadas à agricultura e pecuária com as consequentes vantagens ao nível da gestão da produção. Nestas áreas, o futuro aponta para a concepção de arquitecturas sensoriais cada vez mais inteligentes o que implica a existência de mecanismos eficientes de suporte à transferência de informação entre dispositivos e estações de controlo e gestão de todo o processo produtivo.

O estudo da adaptação deste tipo de tráfego em redes de comunicação, tendo em vista o alargamento das áreas abrangidas, do número de equipamentos a interligar e da integração com outro tipo de equipamentos e sistemas foi efectuado baseado no estudo de sistemas e aplicações relacionados com a agro-pecuária. No entanto, apesar das especificidades destes sistemas e aplicações, é possível alargar a sua área de aplicação uma vez que os requisitos destes são bastante semelhantes a outros usados nas diversas aplicações de controlo industrial.

Este estudo identificou a necessidade de interligar um número elevado de dispositivos e sistemas com requisitos de tráfego diversos. Por outro lado, a necessidade de alargar a área abrangida conduz à definição de uma arquitectura de suporte para aplicações de controlo suportadas numa infra-estrutura de rede.

A escolha da tecnologia de rede de suporte a toda a infra-estrutura de comunicação é de capital importância. Com efeito, esta deverá permitir garantir os seguintes requisitos:

- endereçamento de um elevado número de dispositivos,
- garantir a satisfação da QoS associada a cada serviço,
- suportar aplicações em áreas de grande dispersão geográfica.

Em primeiro lugar será necessário inventariar e caracterizar os dispositivos a interligar, de modo a ser possível especificar as características de tráfego (e.g. débito, QoS). Seguidamente será necessário definir uma estrutura de multiplexagem capaz de agregar o tráfego proveniente das várias fontes de forma a ser transmitido na rede duma forma eficiente assim como permitir definir os requisitos de QoS associados ao transporte de cada fluxo de informação. Finalmente, será necessário efectuar o estudo de algoritmos de escalonamento temporal de forma a ser possível multiplexar os vários fluxos em função da QoS definida para cada um.

1.2 Objectivos e contributos do trabalho desenvolvido

O estudo da adaptação de tráfego de baixo débito, gerado pelas aplicações de controlo industrial permitiu, por um lado, identificar algumas limitações das capacidades de transmissão, endereçamento, área de cobertura dos actuais sistemas de aquisição de dados e controlo e de interligação remota de diferentes redes industriais e, por outro, constatar que recorrendo às redes públicas de telecomunicações, designadamente às redes ATM (ATM, *Asynchronous Transfer Mode*), poderia ser encontrada uma solução para superar essas limitações.

Neste contexto, o trabalho apresentado nesta tese, explorou vários cenários para interligação remota de sistemas de aquisição de dados e de controlo, tendo estabilizado numa solução caracterizada por uma arquitectura centralizada com dois níveis de concentração de tráfego.

A especificação, a implementação e a análise de desempenho desta solução constituem as três contribuições fundamentais deste trabalho.

Em primeiro lugar, foi definida a arquitectura proposta, que inclui uma aplicação de controlo remoto para interligar os diversos dispositivos através de dois módulos fundamentais: o Adaptador de terminal e o Concentrador. O primeiro destina-se a efectuar a ligação directa ou indirecta dos sensores e / ou actuadores, enquanto que o segundo permite interligar os vários Adaptadores de terminal, efectuando um espécie de multiplexagem de segunda ordem.

Posteriormente, foi necessário inventariar e caracterizar as diversas fontes geradoras de tráfego do ponto de vista de débito gerado, características temporais e estatísticas de tráfego, para dimensionar os módulos necessários ao suporte de aplicações. Mostrou-se necessário também definir uma estrutura de multiplexagem capaz de suportar o transporte da informação das diversas fontes de tráfego duma forma eficiente, quer do ponto de vista da rede, quer do ponto de vista da satisfação da QoS exigida pelo serviço.

A QoS dos diversos serviços a suportar está directamente relacionada com o atraso que a informação demora a percorrer entre a fonte e o destino. O atraso de transmissão é composto por duas componentes: o atraso de propagação na rede e os atrasos de empacotamento no Adaptador de terminal e no Concentrador. A primeira componente resulta da escolha da rede ATM como suporte e como tal terá de ser negociada uma ligação que garanta a QoS requerida. A segunda, requer o estudo detalhado de algoritmos de escalonamento de forma a que serviços que imponham restrições temporais tenham prioridade mais elevada nas diversas fases dos processos de empacotamento.

No sentido de avaliar correctamente a especificação dos diversos módulos do sistema foi necessário criar modelos computacionais de forma a ser possível simular o seu comportamento e desempenho. Neste contexto, foram avaliados os vários Algoritmos de escalonamento usados no Adaptador de terminal e no Concentrador.

1.3 Organização da Tese

Este documento, que apresenta os estudos efectuados que conduziram à especificação, desenvolvimento e avaliação de desempenho duma solução que permite interligar remotamente um elevado número de sensores e actuadores e superar algumas limitações de alguns sistemas de aquisição de dados e controlo, está organizado em 7 capítulos.

Após esta introdução, segue-se o capítulo 2, onde são apresentadas, duma forma resumida, as principais funcionalidades suportadas pelas Redes de Telecomunicações existentes actualmente.

No capítulo 3 serão apresentadas e analisadas as várias tecnologias de rede candidatas ao suporte de sistemas de controlo. Em particular, são apresentadas as principais tecnologias usadas no suporte das redes industriais e identificadas as suas limitações. Seguidamente, é apresentado o Modo de Transferência Assíncrono ATM, que constitui a base tecnológica de suporte da solução proposta. São também analisadas as tecnologias de rede de área local, nomeadamente a tecnologia Ethernet (IEEE 802.3).

No capítulo 4 será efectuado o estudo da adaptação de tráfego de baixo débito em aplicações de controlo. Através da apresentação de um modelo de referência genérico, são definidos critérios de QoS para os diversos sistemas e dispositivos a suportar. Seguidamente, é apresentado um estudo comparativo das capacidades de transmissão e de outros parâmetros de QoS, suportados pelas redes de telecomunicações, bem como pelos principais Barramentos

de Campo, para justificar a possibilidade de utilização das redes públicas de telecomunicações e da tecnologia ATM, como suporte do modelo proposto e sumariamente introduzido. Finalmente, é apresentado um estudo genérico sobre escalonamento de tráfego, introduzindo os Algoritmos de escalonamento temporal especificados para a garantia da QoS na multiplexagem dos diversos fluxos de baixo débito

No capítulo 5 será apresentada a especificação do sistema proposto, constituída por dois módulos fundamentais: o Adaptador de terminal e o Concentrador. Estes módulos são descritos com detalhe, assim como são apresentadas as funções principais da Aplicação de controlo.

No capítulo 6 analisa-se o desempenho do sistema, apresentando e discutindo resultados dos diversos testes efectuados aos Algoritmos de escalonamento estudados, para definir a solução a adoptar.

Finalmente, no capítulo 7 apresentam-se as Conclusões deste trabalho, perspectivando alguns desenvolvimentos passíveis de trabalho futuro.

2

Redes de telecomunicações

Um século após a descoberta do telefone, as redes de telecomunicações sofreram uma profunda transformação com o consequente aparecimento de um grande número de novos e atractivos serviços. A evolução tecnológica no domínio da micro-electrónica permitiu a introdução das técnicas digitais ao nível da transmissão e comutação. A introdução das fibras ópticas permitiu melhorar a qualidade das ligações (e.g. menores taxas de erros, baixa atenuação), aumentar o seu débito, transportar um maior e diversificado número de serviços e alargar a área geográfica abrangida.

As redes públicas de comunicação eram caracterizadas por uma especialização de acordo com o tipo de serviço transportado. Vejamos alguns exemplos de redes públicas:

- **Rede de telex:**

Esta rede transporta mensagens constituídas por caracteres, com débitos muito baixos (até 300 bit/s). Os caracteres são codificados baseados num código de 5 bits (código de Baudot).

- **Rede telefónica pública:**

Esta rede, também conhecida como rede pública de comutação de circuitos telefónicos (PSTN, *Public Switched Telephone Network*), oferece aos utilizadores o sistema clássico de transmissão de voz bidireccional.

- **Redes públicas de dados:**

A informação é transportada através de uma rede de comutação de pacotes (PSDN, *Packet Switched Data Network*) baseada nos protocolos X.25 ou, em alguns países, através de uma rede digital de comutação de circuitos (CSDN, *Circuit Switched Digital Network*) baseada nos protocolos X.21.

- **Redes de TV:**

Os sinais de televisão podem ser transportados de três maneiras: difundidos através de ondas rádio usando antenas terrestres, por uma rede de transmissão por cabo em árvore (CATV, *Community Antenna TV*) e via satélite por meio do sistema conhecido como DBS (DBS, *Direct Broadcast System*).

Cada uma destas redes foi especialmente concebida para transportar um serviço específico e, geralmente, não pode ser aplicada no transporte de um outro serviço diferente. No entanto, existe um número limitado de casos em que uma rede, destinada a transportar determinado tipo de serviço, consegue transportar um outro diferente. É o caso, por exemplo, da rede telefónica que consegue transportar dados de débito limitado quando usa Modems (*Modem*, *modulator* / *demodulator*) em ambos os extremos da linha.

Uma consequência imediata desta especialização em função do serviço é a existência de um elevado número de redes independentes, cada uma requerendo a sua fase de projecto, implementação e manutenção. Além disso, o dimensionamento de cada rede é feito individualmente para cada serviço específico, o que impossibilita o uso dos recursos disponíveis de uma rede por um outro serviço para a qual a rede não foi projectada.

É neste contexto que, sendo viável tecnologicamente, se torna atraente a criação de uma rede universal, capaz de integrar todo o tipo de serviços (IBCN, *Integrated Broadband Communications Network*).

O primeiro passo neste sentido foi dado com a introdução da RDIS[1] (RDIS, Rede Digital com Integração de Serviços). Esta rede, embora capaz de integrar serviços de voz e dados num único meio de transmissão, não permite o transporte de sinais TV devido às suas capacidades limitadas em termos de largura de banda. Por outro lado, e embora exista uma interface de

[1] ou ISDN- *Integrated Services Digital Network*

acesso normalizada entre o utilizador e a rede, coexistem internamente e de uma forma temporária, duas redes especializadas em voz e dados.

Uma outra desvantagem da RDIS é a incapacidade desta poder beneficiar com a evolução dos algoritmos de codificação de voz e imagem. Uma vez que o transporte de informação na RDIS é baseado em canais de débito fixo, os recursos da rede serão usados de uma forma ineficiente, já que o débito necessário para transmitir determinado serviço será, no futuro, cada vez mais reduzido para além de alguns serviços poderem gerar tráfego de débito variável (VBR, *Variable Bit Rate*).

Assim, as redes de telecomunicações actuais deverão possuir os seguintes requisitos:

- **Flexibilidade e capacidade de evolução:**

Os avanços no estado da arte dos algoritmos de codificação e da tecnologia VLSI (VLSI, *Very Large Scale Integration*) poderão reduzir a largura de banda necessária ao transporte dos serviços existentes. Uma rede capaz de transportar todo o tipo de serviços será também capaz de se adaptar às novas necessidades que se lhe apresentarão.

- **Uso eficiente dos recursos disponíveis:**

Os recursos da rede poderão ser partilhados por todos os serviços, de modo a obter uma óptima partilha estatística de recursos.

- **Baixos custos:**

Uma vez que só uma rede necessita de ser projectada, implementada, explorada e mantida, os custos globais serão naturalmente reduzidos. Este factor, permitirá a criação de *standards* universais, atrair novos mercados e suscitar o interesse dos fabricantes.

A União Internacional de Telecomunicações (ITU, *International Telecommunication Union*), o ETSI (ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*) e o ATM Forum desenvolveram esforços, durante o fim dos anos oitenta e o princípio dos anos noventa, no sentido de criar as recomendações necessárias à implementação de uma rede universal e integradora de todos os serviços de telecomunicações, definindo também o modo de transferência assíncrono ATM (ATM, *Asynchronous Transfer Mode*).

As secções seguintes descrevem as características principais de redes de telecomunicações existentes. A abordagem não pretende ser muito exaustiva, limitando-se apenas a apresentar as características mais importantes, dando uma perspectiva histórica, por um lado, e permitir,

por outro, a compreensão e enquadramento do trabalho desenvolvido. Além disso, algumas destas tecnologias poderão ser usadas, no sistema apresentado, em ligações ponto-a-ponto, onde não seja possível interligar os dispositivos através dos meios de comunicação convencionais.

2.1 Rede Telefónica Analógica

As primeiras redes públicas de telecomunicações caracterizavam-se pelo uso de tecnologia totalmente analógica, quer ao nível da transmissão, quer ao nível da comutação. Nesta fase de desenvolvimento o serviço essencial era o telefónico, existindo paralelamente o serviço de telex e, posteriormente, a transmissão de dados na própria rede telefónica, recorrendo ao uso de *Modems* nos pontos de acesso à rede.

Muito embora a evolução tecnológica aponte no sentido do uso das técnicas digitais, as redes analógicas poderão continuar a existir, pelo menos em áreas geográficas onde as características dos utilizadores não justificam o investimento numa nova infra-estrutura de telecomunicações. Além disso, com o uso de *Modems,* é possível a transmissão digital de dados a baixas cadências, permitindo o acesso a algumas redes digitais de dados.

2.2 Modos de transferência de informação

As redes telefónicas digitais e as redes de dados recorrem a diferentes técnicas de comutação e concentração (multiplexagem) da informação. A seguir são introduzidos os dois modos de transferência clássicos, suportados pelos sistemas de comunicação, onde a transferência da informação é efectuada por comutação de circuitos ou por comutação de pacotes.

2.2.1 Comutação de Circuitos

Este modo de transferência, característico das redes telefónicas digitais, consiste no estabelecimento de um circuito durante a chamada, em que é usada a técnica TDM (TDM, *Time Division Multiplexing*), para transportar a informação de um nó para outro. Esta técnica é também vulgarmente referida como STM (STM, *Synchronous Transfer Mode*).

A informação é transferida com uma dada frequência (e.g. 8 bits em cada 125µs para 64kbit/s ou 1000 bits em cada 125µs para 8Mbit/s). A unidade básica de repetição, correspondente a cada fluxo individual de informação, é chamada *time-slot*. Várias ligações são multiplexadas temporalmente numa única ligação física através da associação de vários *time-slots* numa trama, que se repetirá igualmente a uma dada frequência. Uma ligação (i.e. um circuito) usará sempre o mesmo *time-slot* da trama durante a duração completa da chamada.

A comutação de circuitos pode ser efectuada internamente na central de comutação através de comutação espacial, comutação temporal ou uma combinação das duas. A comutação de um circuito de uma linha de entrada para uma linha de saída é controlada por uma tabela de conversão, que contém a relação da linha de entrada e do número do *time-slot*, com a linha de saída e do *time-slot* associado.

A Figura 2-1 ilustra um pequeno exemplo desta técnica. A conexão D da trama de entrada 1 ocupa o *time-slot* 4, e será sempre transferida (comutada) para a trama de saída 3 no *time-slot* 1. Só quando a conexão termina, o *time-slot* 4 da trama 1 pode ser comutado para outro *time-slot,* de uma outra ligação. Esta relação é mantida inalterada durante a duração completa da chamada, isto é, esta relação determina o circuito. Na figura estão também ilustrados exemplos de comutação espacial, temporal e mista.

Trama de Entrada	Slot	Trama de Saída	Slot
1	1 2 3 4 5	1 1 1 3 1	1 2 3 1 5
2	1 2 3 4 5	1 2 2 2 2	4 2 3 4 5
3	1 2 3 4 5	2 3 3 3 3	1 3 2 4 5
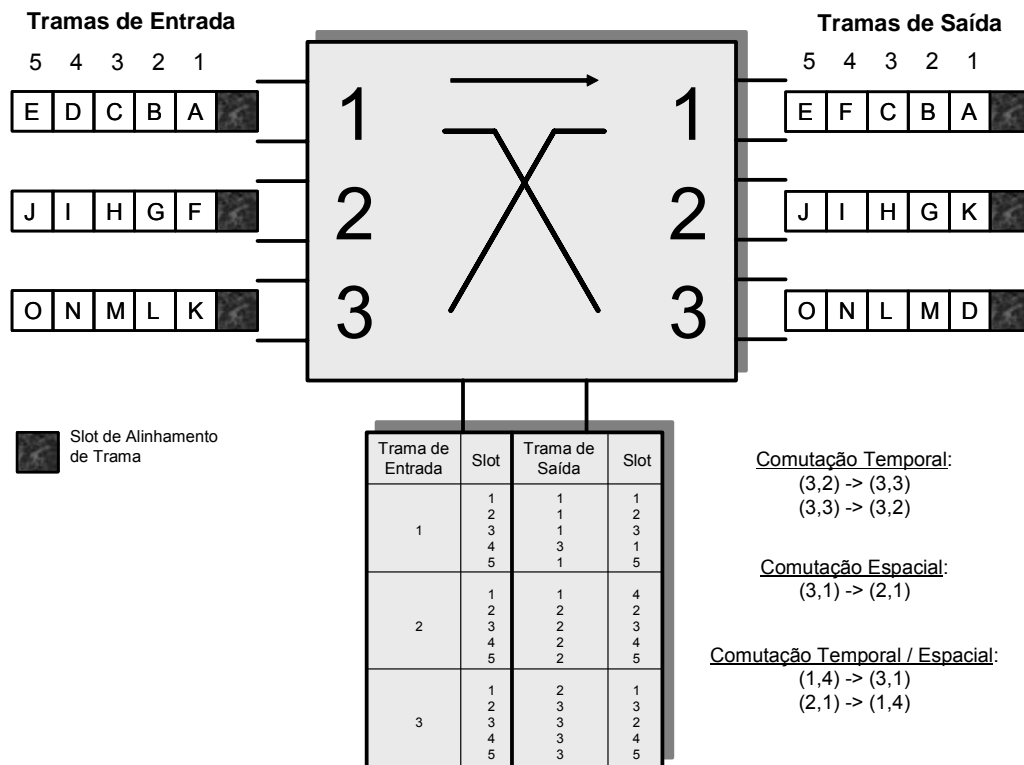
Figura 2-1: Comutação de Circuitos.

A comutação de circuitos é pouco flexível já que, uma vez determinada a duração do *time-slot,* a taxa de transmissão é fixa. Por exemplo, com a técnica PCM (PCM, *Pulse Coded Modulation*) usada na recomendação G.703 [ITU91a], a duração de um *time-slot* de 8 bits é de 125μs, dando origem a canais de 64kbit/s.

2.2.2 Comutação de Pacotes

Nas redes de comutação de pacotes, a informação do utilizador é encapsulada em pacotes que contêm informação adicional (no cabeçalho) usada no interior da rede para encaminhamento, correcção de erros, controlo de fluxo, etc.

Estas redes, tais como a rede X.25, foram criadas nos anos 70, em que a qualidade dos meios de transmissão era relativamente fraca e os débitos no acesso à rede baixos (da ordem dos kbit/s). De modo a garantir um desempenho ponto-a-ponto aceitável, em cada ligação da rede, foi necessário implementar protocolos complexos que efectuavam, basicamente, o controlo de erros e de fluxo em cada troço da rede.

Estes pacotes possuem um comprimento variável e, por isso, requerem uma gestão complexa de *buffers* no interior da rede. A velocidade lenta de operação possibilita ao *software* de controlo um desempenho adequado, mas produz atrasos relativamente longos.

A elevada complexidade dos protocolos aumenta substancialmente os requisitos de processamento e o atraso de comutação no interior da rede. Deste modo, torna-se difícil aplicar esta técnica a serviços de tempo real (o atraso é elevado devido às retransmissões de pacotes com erro) e a serviços de débito elevado (os requisitos de processamento são muito elevados). No entanto, a técnica de comutação de pacotes é bastante eficiente em aplicações de transferência de dados de baixo débito, de que é exemplo a rede X.25.

Como consequência da evolução da comutação em modo pacote na rede pública digital, desenvolveram-se soluções alternativas designadas por *frame-relaying e frame-switching*, actualmente contempladas pelo ITU-T. Estas soluções requerem menos funcionalidade na rede que o X.25 e são possíveis devido ao aumento da qualidade das ligações, com a consequente redução da complexidade nas funções a implementar nos nós, o que permite elevar o débito das ligações.

2.3 Rede Telefónica Digital

A digitalização da rede telefónica conheceu duas etapas. Numa primeira fase, foi introduzida a digitalização apenas ao nível da transmissão (entre centrais) continuando a comutação a ser analógica. As principais vantagens na transmissão digital são:

- eliminação quase total do ruído de transmissão resultante da tolerância ao ruído da codificação digital e da introdução de regeneradores ao longo da linha de transmissão,
- recuperação do sinal analógico sem atenuação resultante do processo de digitalização.

A segunda fase, consistiu na introdução da digitalização ao nível da comutação. A rede resultante, também conhecida como RDI (RDI, Rede Digital Integrada), tira partido das seguintes vantagens:

- diminuição da complexidade das interfaces devido à uniformização da tecnologia digital utilizada,
- um melhor aproveitamento de recursos uma vez que os sistemas de comutação utilizados além de efectuarem a comutação espacial, tal como os sistemas electromecânicos, efectuam a comutação temporal,
- mecanismos mais elaborados e eficientes de gestão e controlo de fluxo possibilitados pela introdução do controlo por programa armazenado (SPC, *Stored Program Control*), já utilizado em algumas redes analógicas.

O sistema mais utilizado na transmissão digital é o vulgarmente conhecido por PCM [Owe94], técnica patenteada em 1939 por Alec Reeves, engenheiro do ITT (ITT, *International Telephone and Telegraph Company*).

Os sinais analógicos são amostrados a uma frequência de 8kHz, quantificados em 256 níveis e codificados em palavras de 8 bits (octetos), requerendo assim canais com uma cadência fixa de 64kbit/s. Os canais são agrupados (multiplexados) numa trama, em intervalos temporais pré-determinados, sendo transmitidos e comutados nesta forma.

2.3.1 Hierarquias plesiócronas

O sistema PCM foi normalizado em duas versões, a europeia e a norte-americana. A Tabela 2-1 indica as principais características das hierarquias PCM, de acordo com o ITU-T.

Tabela 2-1: Características das hierarquias PCM.

Nível da Hierarquia	Sistemas de Transmissão PCM			
	Europeu		Norte-americano	
	Débito (kbit/s)	Capacidade (Nº de canais)	Débito (kbit/s)	Capacidade (Nº de canais)
	64	B	64	B
1º	2 048	H12 = 30B	1544	H11 = 24B
2º	8 448	4 × H12	6312	4 × H11
3º	34 368	H21 = 4 × 4 × H12	32064	5 × 98B
			44736	H22 = 7 × H11
4º	139 264	H4 = 4 × H21	97728	3 × 5 × 98B
			274176	6 x H22

Em ambas as versões as funções efectuadas são idênticas, distinguindo-se uma da outra apenas nos débitos envolvidos. Na Europa, África e América do Sul é usado o sistema que agrupa 30 canais de 64kbit/s numa trama, enquanto que nos Estados Unidos, Canadá e Japão são agrupados 24 canais de 64kbit/s. Em ambos os casos existem canais dedicados para sincronização emissor/receptor e para sinalização.

As hierarquias PCM, também chamadas plesiócronas (PDH, *Plesiochronous Digital Hierarchy*) têm a particularidade de não necessitarem de um relógio de referência comum. É permitida uma tolerância no débito dos tributários relativamente ao débito nominal. Esta técnica provoca deslizamentos na fase do ciclo de repetição das tramas de nível superior se os débitos não forem coincidentes. Os desvios nos débitos dos canais afluentes são compensados através do uso da técnica de justificação, consistindo esta na inserção / remoção de bits da trama para adaptar os débitos.

2.3.2 Hierarquia digital síncrona

Uma outra tecnologia de transporte baseia-se na hierarquia digital síncrona (SDH, *Synchronous Digital Hierarchy*) que, para além de transmitirem novos canais de banda larga, permitem o transporte dos vários níveis hierárquicos dos sistemas PDH, garantindo o acesso directo a cada canal multiplexado sem recorrer à desmultiplexagem dos tributários. A Figura 2-2 mostra como são definidos os contentores virtuais (VC, *Virtual Container*) que permitirão a transmissão dos tributários das hierarquias dos sistemas PDH na hierarquia digital síncrona [Omi93].
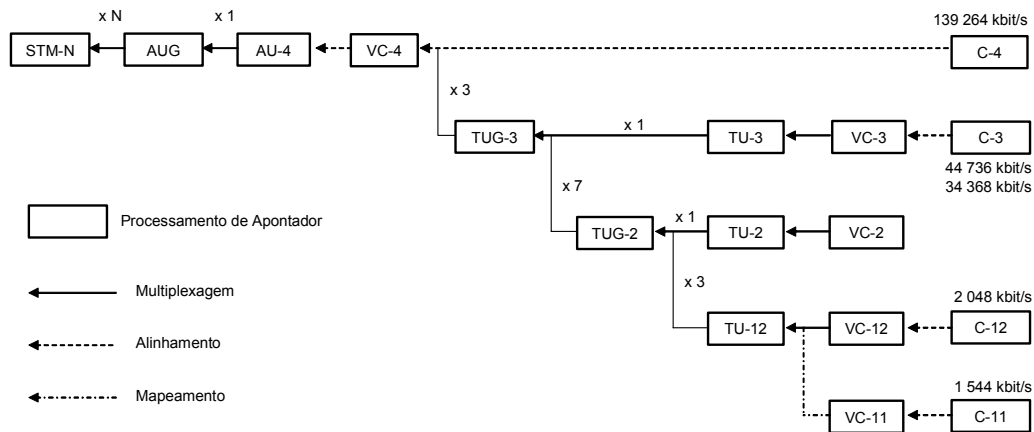
Figura 2-2: Estrutura de multiplexagem dos canais plesiócronos na hierarquia digital síncrona.

Para sincronização do processo de multiplexagem, são adicionados aos contentores virtuais cabeçalhos com funções de apontadores. Os blocos compostos pelo contentor e respectivos cabeçalhos constituem as unidades lógicas tributárias (TU, *Tributary Unit*) e administrativas (AU, *Administration Unit*). Os TUGs (TUG, *Tributary Unit Group*) são estágios intermédios antes de se atingir o VC-4.

Os sistemas hierárquicos digitais síncronos diferem dos sistemas de transmissão plesiócronos (PDH) na sincronização, no modo de multiplexagem dos canais transportados em cada nível hierárquico e nas capacidades de operação e manutenção (OAM, *Operation and Maintenence*).

As tramas dos níveis superiores da hierarquia do sistema SDH são constituídas por justaposição das tramas dos níveis inferiores, sem inclusão de cabeçalhos adicionais, uma vez que os débitos são sincronizados por um relógio comum. A multiplexagem é baseada extensivamente em apontadores, podendo as estruturas mapeadas numa trama STM-1 (STM-1*, Synchronous Transport Module-1*) flutuar umas em relação às outras. As capacidades de OAM são suportadas pela provisão de cabeçalhos nos contentores virtuais e nas tramas STM.

A Tabela 2-2 apresenta o débito e a capacidade de cada tributário nos sistemas de transmissão e multiplexagem síncronos. Cada módulo STM-1 consiste num campo de informação e um cabeçalho incluídos numa trama constituída por 9 × 270 octetos, como mostra a Figura 2-3.

O cabeçalho da trama (SOH, *Section Overhead*) tem 9 × 9 octetos, independentemente das combinações de contentores virtuais transportados no campo de informação da trama. No cabeçalho da trama STM-1 existe um apontador para a unidade administrativa do contentor virtual VC-4.

Tabela 2-2: Níveis de multiplexagem e velocidades de transmissão da Hierarquia Digital Síncrona - SDH.

Nível da Hierarquia	**Sistemas de Transmissão Síncronos**	
	Débito (kbit/s)	Capacidade (Nº de Tributários)
STM-1	155 520	ver Figura 2-3
STM-4	622 080	4 × STM-1
STM-8	1 244 160	8 × STM-1
STM-12	1 866 240	12 × STM-1
STM-16	2 488 320	16 × STM-1
STM-32	4 976 640	32 × STM-1
STM-64	9 953 280	64 × STM-1
STM-256	39 813 120	256 × STM-1

As hierarquias digitais plesiócronas estão na base da maior parte dos sistemas de transmissão instalados e, devido à compatibilidade assegurada pela hierarquia digital síncrona, aqueles deverão ser ainda, durante alguns anos, o suporte terrestre de transmissão da maior parte dos sistemas de telecomunicações.
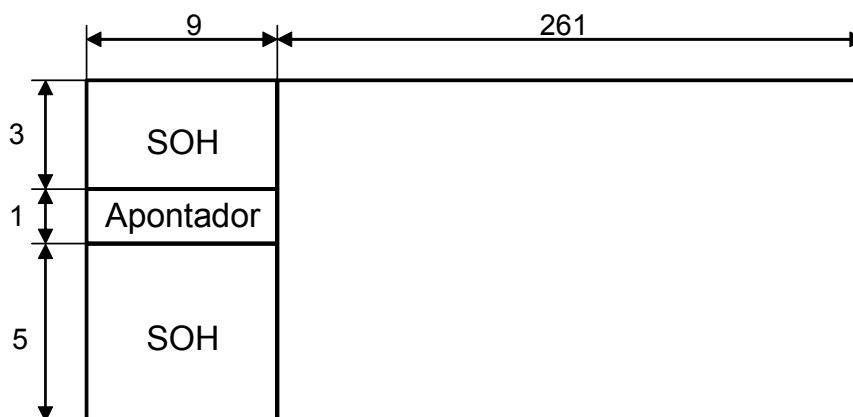
Figura 2-3: Estrutura da trama STM-1 na hierarquia digital síncrona.

2.3.3 SONET

Os estudos que deram origem aos sistemas SONET (SONET, *Synchronous Optical NETwork*) e SDH foram efectuados nos Laboratórios BELL nos EUA e, em 1988, com a ajuda dos grupos de normalização europeus e japoneses, o CCITT procedeu à sua normalização [Orz98].

A rede SONET foi originalmente projectada para suportar o transporte da hierarquia digital plesiócrona DS-1 a 45Mbit/s. Deste modo, o nível inferior da hierarquia é o STS-1 (STS-1, *Synchronous Transport Signal - Level 1*) a 52Mbit/s. As diferenças entre as redes SONET e SDH são mínimas. Enquanto que a rede SDH usa um formato de dados de transporte chamado VC-4 (VC-4, *Virtual Container Type - 4*), a rede SONET usa um formato chamado VC-3 (VC-3, *Virtual Container Type - 3*) mais adequado ao transporte dos sinais das hierarquias PDH Norte Americanas. Os níveis de multiplexagem, assim como as velocidades de transmissão das redes SONET e SDH estão ilustradas na Tabela 2-3.

Tabela 2-3 Hierarquias Digitais Síncronas SDH e SONET. Níveis de multiplexagem e velocidades de transmissão.

SONET	SDH	Débito (Mbit/s)
STS-1		51.840
STS-3	STM-1	155.520
STS-9		466.560
STS-12	STM-4	622.080
STS-18		933.120
STS-24		1244.160
STS-36		1866.240
STS-48	STM-16	2488.320
STS-96	STM-32	4976.640
STS-192	STM-64	9953.280

2.4 Redes de Dados

As redes de dados surgiram em resposta a necessidades crescentes de comunicação generalizada entre computadores de forma a suportar novos e diversos requisitos de utilizadores. Constituíram por um lado, uma alternativa (em termos de desempenho, custos, e serviços oferecidos) a soluções tradicionais do tipo centralizado e, por outro, à utilização de meios de transmissão da rede telefónica pública (linhas comutadas ou alugadas) com limitações reconhecidas.

As redes digitais de dados oferecendo soluções mais económicas, mais fiáveis e mais flexíveis criaram condições favoráveis à utilização generalizada de recursos computacionais distribuídos, inclusive por pessoas e organizações não contempladas pelas soluções tradicionais.

O tráfego destas redes caracteriza-se por débitos elevados em intervalos de tempo relativamente curtos, associados a períodos de inactividade durante intervalos de tempo relativamente longos (*bursts*), o que recomenda uma partilha de recursos dinâmica no tempo dos diversos utilizadores da rede.

A informação dos utilizadores é encapsulada em pacotes de comprimento fixo ou variável. Estes pacotes possuem campos dedicados com funções de encaminhamento, controlo de erro e controlo de fluxo.

Os pacotes são enviados pela rede de uma forma autónoma. Em cada nó, os pacotes são armazenados e transmitidos para o nó seguinte, quando existirem recursos de transmissão disponíveis[2].

A necessidade de definir protocolos de acesso ao meio de transmissão, interfaces e mecanismos de gestão comuns levou à criação do Modelo de Referência de Sistemas Abertos - Modelo OSI (OSI, *Open Systems Interconnection*) da ISO (ISO, *International Standards Institute*). O Modelo OSI descreve o processo de comunicação segundo um modelo hierárquico estruturado em sete camadas. Cada camada executa funções independentemente das outras, passando informação para a camada inferior ou superior. As sete camadas são:

- Camada 1: Física
- Camada 2: Ligação de dados
- Camada 3: Rede
- Camada 4: Transporte
- Camada 5: Sessão
- Camada 6: Apresentação
- Camada 7: Aplicação

As três primeiras camadas executam funções relacionadas com o transporte de informação através da rede, enquanto que as restantes quatro efectuam funções extremo-a-extremo, dependentes do serviço transportado.

Foram desenvolvidos diversos protocolos para as diferentes camadas do Modelo OSI, tendo surgido várias redes de dados, com destaque para as Redes de Área Local (LAN, *Local Area*

[2] Este mecanismo é vulgarmente conhecido por *store-and-forward*.

Network), as Redes Metropolitanas (MAN, *Metropolitan Area Network*) e as Redes Públicas de Comutação de Pacotes X.25.

2.4.1 Normalização IEEE

No final da década de 60 entrou em funcionamento uma rede sem fios chamada ALOHA, que utilizava o primeiro algoritmo que permitia a comunicação entre estações utilizando um canal único. Esse algoritmo ficou conhecido como protocolo de acesso múltiplo e permitia que estações de trabalho existentes nas ilhas do Hawai comunicassem entre si, através de um sistema de comunicação por satélite instalado sobre o Pacífico. Nessa rede, qualquer estação transmitia quando tinha dados a transmitir, e esperava por uma confirmação que indicava se a informação tinha chegado ao destino. Caso essa confirmação não chegasse, significava que tinha ocorrido uma colisão, ou seja, outra estação tinha transmitido simultaneamente. Nesse caso, a estação esperava um tempo aleatório e tentava novamente.

Esse sistema, conhecido por ALOHA puro, tinha uma eficiência baixa (aproximadamente 18%). Posteriormente, foi introduzida uma melhoria nesse sistema ("*Slotted* ALOHA") em que a transmissão de pacotes era sincronizada por um relógio, onde as estações só transmitiam em instantes bem definidos. O resultado desta alteração fez com que as colisões só ocorressem no início das transmissões, e não durante o tempo de transmissão da informação. A eficiência aumentou aproximadamente para o dobro (cerca de 37%).

Posteriormente, baseando-se nesta técnica, Robert Metcalfe introduziu em 1972, nos laboratórios da Xerox uma rede onde todas as estações partilhavam o mesmo meio físico de transmissão (cabo coaxial) a uma taxa de transmissão de 2,94Mbit/s. A esta rede foi dado o nome de "Ethernet" de modo a fazer a analogia ao éter, que se acreditava que era o meio que preenchia o Universo e o espaço entre os corpos celestes, onde se propagavam as ondas electromagnéticas pelo espaço, da mesma forma que a rede Ethernet seria o meio que transportaria a informação entre todas as estações.

Desde então, têm sido desenvolvidas diversas tecnologias, tendo sido algumas delas normalizadas e bastante utilizadas actualmente em redes de comunicação. No caso particular das LANs, o IEEE (IEEE, *Institute for Electrical and Electronics Engineers*) teve um papel preponderante na definição e normalização das tecnologias relacionadas com estas redes.

A Tabela 2-4 apresenta alguns grupos de trabalho responsáveis pela normalização dessas tecnologias, algumas das quais estão a ser discutidas e outras foram já normalizadas [IEEE99].

Tabela 2-4: Grupos de trabalho do IEEE para a rede de área local

Grupo	Descrição	Estado
802.1	Higher Layer LAN Protocols Working Group; GPRP, Multiple Spanning Trees, 802.1D, 802.1Q, VLAN Classification by Protocol and Port, Rapid Reconfiguration of Spanning Tree, Port Based Network Access Control, MAC bridges, Remote MAC bridging, Virtual LANs	activo
802.2	Logical Link Control Working Group	inactivo
802.3	Ethernet Working Group; 10Gbit/s Ethernet, Trunking, 802.3 Higher Speed Study Group, Gigabit Ethernet, 1000BASE-T, VLAN TAG, Link Aggregation, CSMA/CD, 10BASE-T, MAC, MAU, Repeater, 1BASE5, 10BASE5, Full Duplex, 100BASE-T, 100BASE-T2, Gigabit Ethernet	activo
802.4	Token Bus Working Group	terminado
802.5	Token Ring Working Group	inactivo
802.6	Metropolitan Area Network Working Group	terminado
802.7	Broadband TAG	terminado
802.8	Fiber Optic TAG	terminado
802.9	Isochronous LAN Working Group	terminado
802.10	Security Working Group	terminado
802.11	Wireless LAN Working Group	activo
802.12	Demand Priority Working Group	inactivo
802.13	Não usado	
802.14	Cable Modem Working Group	terminado
802.15	Wireless Personal Area Network (WPAN) Working Group	activo
802.16	Broadband Wireless Access Working Group	activo
802.17	Resilient Packet Ring Working Group	activo
802.18	Radio Regulatory TAG	activo
802.19	Coexistence TAG	activo
802.20	Mobile Broadband Wireless Access (MBWA) Working Group	activo
802.21	Media Independent Handoff Working Group	activo
802.22	Wireless Regional Area Networks	activo

2.4.2 Protocolos TCP/IP

A rede Internet deve o seu nome ao facto de a sua estrutura global poder ser assimilada a um conjunto de redes (tipicamente redes locais) interligadas através de uma malha arbitrária de equipamentos de encaminhamento de pacotes (*routers*) interligados entre si por canais de comunicação de dados [Mar97].

Do ponto de vista da sua estrutura, a rede Internet pode ser estruturada em quatro níveis como mostra a Figura 2-4:
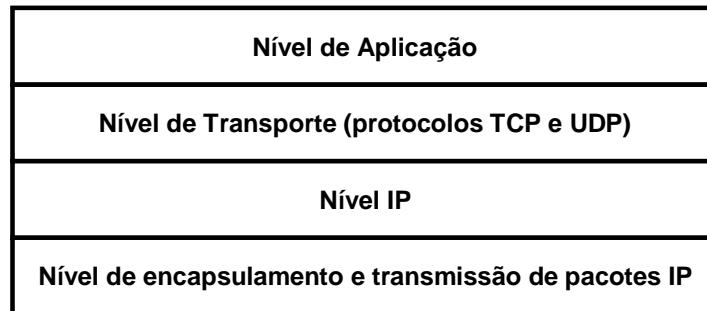
Figura 2-4: Estrutura da família de protocolos TCP/IP.

Os protocolos essenciais para o funcionamento da Internet ou, pelo menos os mais relevantes, são o protocolo IP (IP, *Internet Protocol*) e o TCP (TCP, *Transport Control Protocol*). Por esta razão é vulgar designar o conjunto de protocolos da Internet por "protocolos TCP/IP".

Cada rede dispõe de um endereço próprio e único a nível mundial. Dentro de cada rede, as estações ligadas (*hosts*) dispõe também de endereços locais, únicos na sua rede. Um endereço Internet é pois formado por duas partes, sendo a primeira essencial para o encaminhamento (*routing*). A concatenação do endereço de rede com o endereço *host* resulta num endereço único a nível mundial também designado por endereço IP.

O nível de rede é implementado através do protocolo IP orientado a datagramas, sem ligação nem circuitos virtuais. Deste modo, o nível de rede encaminha cada pacote, da origem ao destino, duma forma independente sem que os *routers* sejam obrigados a guardar informação de estado dos pacotes transmitidos anteriormente. Daqui resulta uma rede com fácil capacidade de adaptação a avarias em geral já que, se ela existir numa ligação ou num *router*, os restantes *routers* podem descobrir e utilizar percursos alternativos, abrindo assim possibilidade de partilha de carga e reconfiguração dinâmica mais difíceis de implementar numa rede baseada em circuitos virtuais.

Os pacotes IP podem ser encapsulados em tramas *Ethernet* ou *Token-Ring*, em sequências de caracteres ASCII sobre ligações telefónicas assíncronas, em tramas de circuitos *Frame-Relay*, em pacotes X.25, em canais RDIS, em células ATM, etc. Na verdade não se conhece nenhuma tecnologia de suporte de circuitos de dados que não possa ser utilizada para o encaminhamento de pacotes IP. É esta característica que retira todo o sentido à apresentação convencional e se indica, abaixo do nível IP, o nível físico. De facto, abaixo do nível IP pode estar qualquer outro nível físico, rede ou de ligação de dados. Daí o facto de na Figura 2-4 se apresentar o nível de encapsulamento e transmissão de pacotes IP em vez dos níveis de ligação de dados e físico.

Em relação ao nível de transporte, são disponibilizados essencialmente dois protocolos, o protocolo UDP (UDP, *User Datagram Protocol*) e o protocolo TCP. Ambos são protocolos extremo-a-extremo pois o nível de rede desconhece a sua existência, sendo da competência dos dois *hosts* a implementação do serviço que o protocolo presta.

No caso do protocolo UDP, dado tratar-se de um protocolo do tipo datagrama, o único serviço que acresce ao nível IP é a multiplexagem na medida em que os pacotes são trocados entre portas acessíveis directamente aos processos que correm no *host*. Desta forma um ou mais programas em execução podem partilhar o mesmo endereço IP. Sendo orientado aos datagramas, este protocolo não oferece qualquer tipo de garantias (*best effort*).

Ao contrário, o protocolo TCP é orientado à ligação garantindo a entrega dos dados. De facto o protocolo TCP disponibiliza canais virtuais de dados fiáveis e sujeitos a controlo de fluxo entre programas. Este protocolo é particularmente sofisticado e as suas evoluções sucessivas incorporam na implementação um conjunto de técnicas que o tornam um dos protocolos orientados à ligação mais sofisticados dos actualmente disponíveis. Por outro lado, adapta-se particularmente bem ao funcionamento da Internet pelo que pode ser considerado um protocolo benigno, ao contrário do protocolo UDP que está a ser usado de forma “selvagem” por certas aplicações.

As aplicações disponíveis na Internet utilizam os protocolos TCP e UDP. As mais conhecidas são o correio electrónico ou *e-mail* (encaminhado entre *gateways* de *mail* por TCP), o acesso a terminais remotos para sessões interactivas e a transferência de ficheiros (ambos utilizando TCP), o HTTP[3] (HTTP, *Hipertext Transfer Protocol*) para acesso à WWW (WWW, *World Wide Web*), o NTTP (NTTP, *Network News Transfer Protocol*) para acesso a fóruns de discussão - *News* (cuja transferência e acesso também se faz por TCP). Outras aplicações emergentes, como o transporte de áudio e vídeo, usam todas o protocolo UDP que exigem características especiais da rede, nomeadamente tempos de chegada e banda passante garantidos. Como é sabido, a Internet não oferece garantias de banda passante e tem uma variância significativa nos tempos de propagação. Assim, uma das soluções é usar o protocolo UDP que não é sujeito a controlo de fluxo. O resultado do uso deste protocolo sobre canais pouco carregados é bastante aceitável mas quando aplicado sobre canais muito congestionados o efeito é catastrófico. Com efeito, enquanto que o tráfego TCP, vai tender a diminuir o débito de transmissão, o tráfego UDP (em que não existe controlo de fluxo) vai manter, de forma abusiva, o mesmo débito. As aplicações sobre TCP terão o seu desempenho

[3] Protocolo do nível Aplicação do tipo cliente-servidor implementado sobre ligações TCP

diminuído enquanto que as aplicações sobre UDP consumirão toda a banda disponível. Esta situação preocupa bastante os operadores pois tem um efeito directo sobre a qualidade de serviço fornecida. Uma das soluções é impor prioridade baixa a este tipo de tráfego sempre que a saturação da rede se aproxima.

2.5 Redes de comunicação sem fios

As tecnologias de comunicação sem fios têm sofrido, nos últimos anos, uma profunda evolução de tal forma que, em alguns países, o número de telefones celulares é superior aos da rede fixa. Em menos de 10 anos o número de assinantes de telefones móveis atingiu níveis que demoraram cerca de um século a atingir nos da rede fixa [Sha00].

Embora as aplicações iniciais das redes sem fios sejam baseadas em serviços de voz, tem-se assistido ultimamente a uma grande desenvolvimento nos serviços de dados e Internet, de que são exemplos o *Bluetooth* e o IEEE 802.11.

Com o aparecimento dos sistemas celulares de 3ª geração, tem sido feito um esforço no sentido de integrar estas duas filosofias e proporcionar ao utilizador o acesso a serviços diversificados de voz, dados e multimédia com a introdução de um conceito fundamental – a mobilidade.

Os parágrafos seguintes fazem uma breve descrição das principais funcionalidades das redes sem fios existentes nos dias de hoje.

2.5.1 GSM

Em 1982, a Conferência Europeia de Correios e Telecomunicações (CEPT, *Conference European Post and Telegraphf*), da qual participavam as administrações das operadoras de telecomunicações de 26 países europeus, criou o *Groupe Spéciale Mobile* que desenvolveu um conjunto de normas para o que então foi denominado de Rede de Rádio Digital Celular Pan-Europeia. Este sistema, agora chamado de GSM (GSM, *Global System for Mobile*), foi projectado com o objectivo de estabelecer um interface comum entre terminais e a rede, permitindo uma capacidade de movimentação em toda a Europa. Em 1987 treze operadores europeus assinaram um Memorandum de Entendimento (MoU, *Memoranda of Understanding*) que deu origem ao início do processo de desenvolvimento do sistema e que conduziu à escolha

do TDMA de banda estreita (nTDMA, *narrowband Time Division Multiple Access*) para o interface aéreo. Em 1989, o trabalho de normalização transitou para o ETSI (ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*) e a operação comercial deste sistema iniciou-se em meados de 1991.

O sistema celular é organizado de uma forma hierárquica [Dan92]. Cada estação-base (BTS, *Base Transceiver Station*) serve, simultaneamente, um determinado número de terminais e um comutador liga os sinais dos utilizadores, através das BTSs, à rede telefónica pública. O sistema global pode ser decomposto em três unidades principais: a estação móvel (MS, *Mobile Station*), o subsistema de estações de base (BSS, *Base Station Subsystem*) e o subsistema de comutação (SSS, *Switching Subsystem*).

O SSS é composto pelo centro de comutação de serviços móveis (MSC, *Mobile service Switching Center*), o centro de operação e manutenção (OMC, *Operation and Maintenance Center*) e as bases de dados associadas. O MSC fornece todos os serviços necessários para o estabelecimento de uma comunicação móvel. Além disso, uma ligação para outros MSCs ou para as redes públicas de telecomunicações, é suportada igualmente pelo MSC. Cada assinante pertence a uma dada PLMN (PLMN, *Public Land Mobile Network*). Toda a sua informação relevante é guardada no HLR (HLR, *Home Location Register*). No caso do assinante estar situado fora do alcance da sua PLMN, toda a informação relevante desse assinante é guardada no VLR (VLR, *Visitor Location Register*) da rede PLMN onde o assinante se encontra. De uma forma geral, o VLR guarda a informação relativa aos utilizadores que se encontram dentro da área coberta por uma dada PLMN, pertencentes a PLMNs remotas. O EIR (EIR, *Equipments Identity Registers*) contém uma lista de todos os equipamentos móveis em uso na rede. Cada equipamento é identificado por um IMEI - (IMEI, *International Mobile Equipment identity Code*). O AUC (AUC, *Autentication Center*) consiste numa base de dados que contém uma copia da chave secreta armazenada no cartão SIM (SIM, *Subscriber Identity Module*).

O OMC é responsável pela administração, que envolve a configuração de parâmetros de certas unidades e supervisão de todos os componentes dentro de uma ou várias PLMNs.

O BSS é composto pela estação de base, o controlador da estação de base (BSC, *Base Station Controller*) e o equipamento de transcodificação (TCE, *Transcoding Equipment*). A BTS serve de interface aérea para a estação móvel. Do lado oposto está ligada ao BCE (BCE, *Base Communication Equipment*) através do equipamento de transcodificação. Este último efectua basicamente uma conversão da taxa de transmissão de 16 para 64kbit/s e vice-versa.

Com a introdução da tecnologia GPRS (GPRS, *General Packet Radio Service*) é possível, às operadoras do serviço GSM, a oferta do acesso a redes de comutação de pacotes (e.g. Internet) com débitos até 115kbit/s.

O suporte da tecnologia GPRS é efectuado através da introdução de dois novos elementos na rede GSM:

- SGSN – Serving GPRS Support Node,
- GGSN – Gateway GPRS Support Node.

Estes elementos interagem com o HLR, o MSC/VLR e o BSS da rede GSM. O GGSM é o ponto de interligação com as redes de dados, ligado ao SGSN através de um backbone IP. Por exemplo, a informação de um utilizador de um terminal GPRS para a Internet é enviada encapsulada através do backbone IP.

O SGSN está ligado ao BSS e reside ao mesmo nível hierárquico que o MSC/VLR. As suas funções principais são o seguimento do utilizador GPRS, segurança e controlo de acesso, ou seja, de uma forma global representa o mesmo papel para o serviço de comutação de pacotes que o MSC/VLR para o serviço de comutação de circuitos. A Figura 2-5 mostra o Modelo de Referência do sistema GPRS [Sha00].
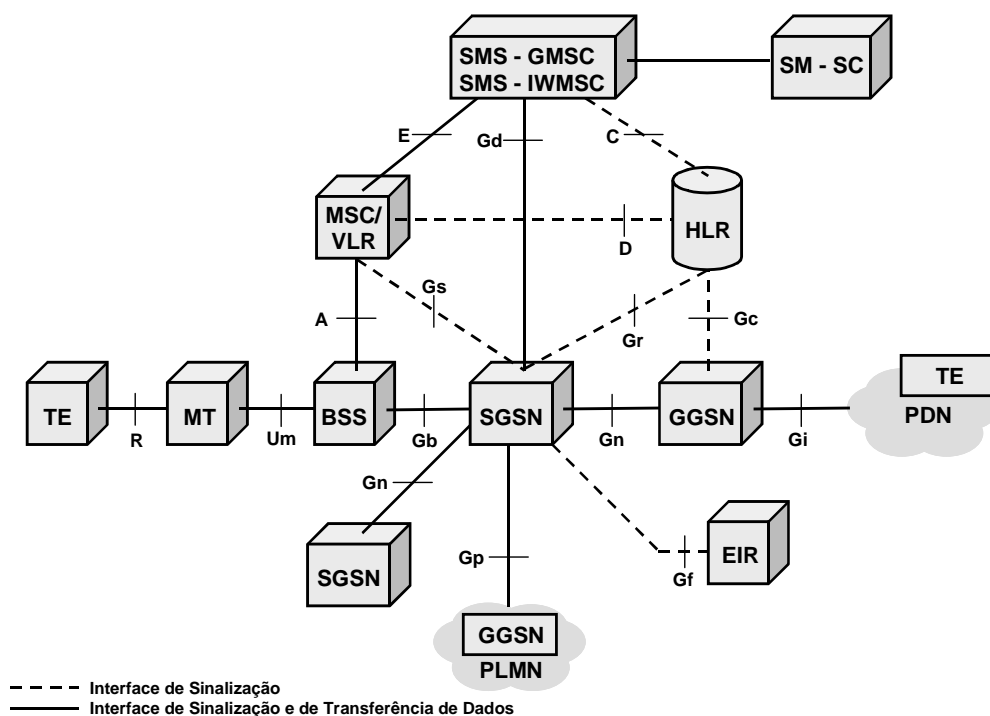
Figura 2-5: Modelo de Referência do Sistema GPRS.

Com a introdução do GPRS foram definidos 3 tipos de terminais móveis:

- Classe A: Suportam simultaneamente o tráfego de comutação de circuitos e de comutação de pacotes,
- Classe B: Idêntico ao da Classe A mas não suporta os dois em simultâneo,
- Classe C: Terminal que suporta apenas um dos modos de comutação.

2.5.2 UMTS

O sistema UMTS (UMTS, *Universal Mobile Telecommunications System*) corresponde à versão europeia da terceira geração (3G) dos sistemas de comunicações móveis, projectado com o intuito de continuar com o sucesso alcançado pelo sistema GSM de segunda geração (2G).

O ITU-T iniciou o processo de normalização, inicialmente referido como IMT-2000 (IMT-2000, *International Mobile Telecommunications 2000*). Na Europa a entidade responsável pela normalização do UMTS é o ETSI. Em 1998 foi criado o 3GPP (3GPP, *Third Generation Partnership Project*) para continuar os trabalhos de especificação técnica.

A rede UMTS é composta por três entidades fundamentais:

- CN - Core Network,
- UTRAN – UMTS Terrestrial Radio Access Network,
- UE - User Equipment.

- **CN - Core Network**

As principais funções da CN são as de implementar mecanismos de comutação, encaminhamento e transporte do tráfego de utilizador, além de garantir a manutenção das bases de dados e a gestão da rede. A sua arquitectura é uma evolução da rede GSM com suporte GPRS e pode ser dividida em dois domínios: Comutação de Circuitos (CC) e Comutação de Pacotes (CP). Os elementos pertencentes ao domínio da Comutação de Circuitos são o MSC, VLR e a Gateway MSC e os elementos pertencentes ao domínio de Comutação de Pacotes são o SGSN e o GGSN. Outros elementos tais como o EIR, HLR e AUC, são partilhados por ambos os domínios.

O modo de transferência assíncrono ATM foi definido como a tecnologia de suporte de transmissão do UMTS[4].

- **UTRAN**

A UTRAN permite a introdução de serviços multimédia devido à largura de banda dos seus canais rádio (5MHz em vez de 200kHz do sistema GSM) e da utilização de um novo método de acesso – CDMA (CDMA, *Code Division Multiple Access*) – técnica de alargamento de espectro que permite aumentar a taxa efectiva de transferência de informação através do uso de códigos que identificam conexões [Qua92] - deste modo, é possível a transferência de informação com débitos até 2Mbit/s.

A UTRAN implementa o interface rádio de acesso entre o equipamento de utilizador (UE) e a rede. O novo método não corresponde a uma evolução do sistema GSM - este continuará a existir mesmo após a introdução do UMTS, o que significa que existirá uma CN comum e duas redes de acesso rádio independentes – uma para o GSM e outra para o UMTS.

- **Serviços**

O UMTS oferece tele-serviços (e.g. voz e SMS) e serviços de suporte. Um tele-serviço é um serviço de comunicação entre um utilizador e um outro utilizador ou um servidor na rede. O serviço é considerado na sua globalidade, o que inclui as funções correspondentes a todas as camadas do modelo OSI (e.g. serviço telefónico). Um serviço de suporte é um serviço que permite a transferência de informação entre utilizadores, podendo ser caracterizado através de um conjunto de parâmetros ou atributos ligados à sua qualidade (e.g. débito do canal, atraso) e por princípios de exploração específicos [Nun92].

É possível negociar e renegociar as características de um serviço de suporte no estabelecimento ou durante uma chamada ou sessão. Os serviços orientados à ligação ou sem ligação são suportados em ligações ponto-a-ponto ou ponto-a-multiponto.

Os serviços UMTS possuem diferentes classes de serviço para 4 tipos de tráfego:

- conversacional (voz, vídeo - telefonia, vídeo - jogos),
- *streaming* (multimedia, *video on demand*, *webcast*),

---

[4] O AAL-2 (AAL-2, *ATM Adaptation Layer - type 2*) suporta as conexões de comutação de circuitos e o AAL-5 (AAL-5, *ATM Adaptation Layer - type 5*) as conexões de comutação de pacotes.

- interactiva (*web browsing*, jogos em rede, acesso a bases de dados),
- *background* (email, SMS, *downloading*).

O UMTS fornece também o conceito de VHE (VHE, *Virtual Home Environment*) que permite a portabilidade de serviços pessoais ao longo da rede e entre terminais.

- **Equipamento terminal**

O Equipamento Terminal funciona como Estação Móvel (EM) e comunica através do interface rádio. Os vários tipos de identificadores, abaixo indicados, que possui foram, na maior parte, retirados das especificações GSM:

- International Mobile Subscriber Identity (IMSI),
- Temporary Mobile Subscriber Identity (TMSI),
- Packet Temporary Mobile Subscriber Identity (P-TMSI),
- Temporary Logical Link Identity (TLLI),
- Mobile Station ISDN (MSISDN),
- International Mobile Station Equipment Identity (IMEI),
- International Mobile Station Equipment Identity and Software Number (IMEISN).

A EM pode operar num dos seguintes modos:

- Modo CP/CC: A EM é alocada a ambos os domínios CP e CC, sendo capaz de suportar simultaneamente serviços de ambos os domínios,
- Modo CP: A EM é alocada só ao domínio CP podendo apenas suportar serviços do domínio CP. No entanto, não impede que serviços do tipo CS sejam oferecidos sobre o domínio CP (e.g. VoIP),
- Modo CS: A EM é alocada só ao domínio CS podendo apenas suportar serviços do domínio CS.

2.5.3 IEEE 802.11

A expansão dos sistemas de comunicação sem fios, nomeadamente dos sistemas de comunicação pessoal (PCS, *Personal Communications Service*) e das redes locais de computadores (WLAN, *Wireless Local Area Network*), que se tem verificado nos últimos anos,

tem constituído um desafio para os investigadores no que respeita ao melhoramento do comportamento destes sistemas, como por exemplo no que se refere à Qualidade de Serviço (QoS, *Quality of Service*) oferecida [Pal99].

Durante décadas as técnicas de comunicação de espectro espalhado (SS, *Spread Spectrum*) foram dominadas essencialmente no âmbito militar. Algumas das suas particularidades, nomeadamente a sua robustez e aparente transparência na presença de outros sinais, tornou esta tecnologia uma alternativa credível para aplicações civis. Presentemente, é a base dos sistemas avançados de comunicação móvel, transmissão segura de dados, localização espacial (GPS, *Global Positioning System*), radar, navegação, comunicações móveis, entre outros [Dix94].

Os sistemas de espectro espalhado começaram a ser considerados no âmbito comercial em 1985, quando a FCC (FCC, *Federal Communications Commission*) inaugurou a banda de frequências ISM (ISM, *Industrial, Scientific and Medical*) para operação não licenciada de equipamentos que cumprissem a recomendação técnica 15.247 da FCC. Esta recomendação permite modulações de espectro espalhado com uma potência máxima de 1W em três bandas - 902 a 928MHz, 2400 a 2483,5MHz, e 5725 a 5850MHz. Em 1990 a comissão modificou a regulamentação de forma a ser possível o suporte de maiores larguras de banda para permitir a utilização de técnicas de saltos em frequência (*Frequency Hopping*).

No caso específico das redes locais de computadores, as normas mais utilizadas nas aplicações comerciais actualmente existentes (i.e. IEEE 802.11) preconizam a transmissão usando técnicas de espectro espalhado. Estas normas suportam dois métodos diferentes de controlo de acesso ao meio (MAC, *Medium Access Control*): o método DCF (DCF, *Distributed Coordination Function*) e o método PCF (PCF, *Point Coordination Function*). O primeiro é caracterizado por um algoritmo de acesso aleatório (CSMA, *Carrier Sense Multiple Access*), com uma filosofia de funcionamento semelhante à das tradicionais redes locais de computadores com fios (LANs) e que suporta os tradicionais serviços assíncronos, seguindo uma política de “melhor esforço”[5] na entrega dos dados. O segundo usa um algoritmo centralizado de controlo de acesso por interrogação ponto-a-ponto (*polling*) que permite suportar tráfego com requisitos específicos.

[5] Em inglês *best-effort*

2.5.4 Bluetooth

O Bluetooth, diferente das redes WLAN, foi criado com o objectivo de eliminar os cabos numa área limitada formando uma PAN (PAN, *Personal Area Network*). O nome Bluetooth (Dente Azul) foi escolhido em homenagem ao rei Viking, Harald Bluetooth que, na Idade Média, unificou as várias tribos nórdicas. O objectivo desta tecnologia, desenvolvida inicialmente pela Ericsson, era oferecer um padrão para a comunicação sem fios que exigisse pouca memória, CPU e que tivesse principalmente um consumo baixo, de modo a poder ser implementada em qualquer tipo de dispositivo sem aumentar significativamente o seu preço.

Esta tecnologia é especialmente útil para interligar computadores, impressoras, *scanners*, telefones móveis, PDAs (PDA, *Personal Digital Assistants*), câmaras digitais, em casa, no escritório ou no automóvel.

A especificação básica das redes Bluetooth [Blu03] permite a operação a um débito em torno de 1Mbit/s (723kbit/s efectivos para dados) e alcance de 10m. O Bluetooth pode parecer extremamente limitado quando comparado com outras tecnologias de redes sem fios como o IEEE 802.11, mas possui uma taxa de transferência de dados comparável aos dispositivos USB (USB, *Universal Serial Bus*) actuais e um alcance maior do que a maioria dos cabos que hoje estão ligados ao computador. Especificações alargadas desta norma permitem o aumento da velocidade de transmissão para 10Mbit/s com 100m de raio, à custa de maior consumo de energia e recorrendo a uma antena auxiliar.

O IEEE está a converter esta especificação numa norma IEEE designada de IEEE 802.15.

- **Redes Ad Hoc (*Piconets*)**

As redes Bluetooth são determinísticas (para acomodar tráfego multimédia) e autónomas, sem necessidade de configuração prévia. Dois ou mais dispositivos Bluetooth “descobrem-se” automaticamente assim que entram no raio de alcance das suas antenas. Por isso, diz-se que as redes Bluetooth são um tipo de rede *Adhoc* ou *plug-and-play*. Não há necessidade de configuração prévia de endereços IP, da configuração de um servidor de nomes ou um *finder* de dispositivos Bluetooth. Durante o processo de descoberta de nós Bluetooth, qualquer um pode assumir o papel de *master* da chamada *piconet*. Este nó é o responsável por indicar a largura de banda disponível para cada um dos restantes, que assumem o papel de *slaves*.

A comunicação é efectuada de um *master* para um *slave* e depois do *slave* para o *master*. Um *slave* não pode comunicar directamente com outro *slave*, e um *slave* só pode transmitir em resposta a um pacote recebido do nó *master*. Assim sendo, qualquer pacote transmitido de um

slave para outro envolve três transmissões: do *master* para o primeiro *slave*, do primeiro *slave* para o *master* e do *master* para o segundo *slave*.

A rede Bluetooth divide o tempo em 79 partes (*slots*) de tamanho fixo. Os slots ímpares são sempre para transmissões do *master* para um *slave*, e os slots pares são reservados para transmissão dos *slaves* para o *master*. Desta forma, o *master* decide qual o *slave* que terá direito a utilizar o próximo *slot* par. Caso o *slave* não tenha dados para transmitir, deve responder com um pacote *NULL* que não contém dados. No caso do *master* não ter dados para transmitir num *slot* ímpar, deve transmitir um pacote de *POLL*, que também não contém dados, de modo a dar a algum *slave* a oportunidade de transmitir.

As redes Bluetooth são orientadas à ligação, ou seja, antes de enviar dados para um dispositivo Bluetooth, deve ser estabelecida uma ligação. Isto permite ao *master* reservar *slots* para cada *slave*, dependendo das necessidades explicitadas pelo dispositivo ou aplicação e da largura de banda já reservada para as outras ligações.

2.6 Rede Digital com Integração de Serviços

A Rede Digital com Integração de Serviços (RDIS) baseia-se na transmissão e comutação digitais, e caracteriza-se por possibilitar aos utilizadores um acesso integrado aos diversos serviços e redes actualmente existentes através de interfaces normalizadas, fisicamente suportadas numa única linha digital [Nun92].

O utilizador poderá assim, através de uma única linha de assinante, ter acesso a um conjunto diversificado de serviços, sob a forma de dados, texto e imagem, com uma característica fundamental: todos estes tipos de informação poderem ser digitalizados.

Com a digitalização da linha local do assinante, os utilizadores passaram a ter acesso a canais digitais de débito muito superior aos permitidos pelas redes analógicas, abrindo caminho à utilização de um grande número de novos serviços e equipamentos terminais.

Numa primeira fase, que corresponde à RDIS dita de banda estreita (RDIS-be), serão abrangidos serviços com um débito máximo de 2Mbit/s. O ITU aprovou, em finais de 1984, um conjunto de recomendações (Série I) que definem os aspectos essenciais da RDIS.

A RDIS utiliza como suporte a rede PCM (ou plesiócrona). O ITU definiu apenas duas interfaces diferentes de acesso dos utilizadores à rede: a interface básica e a interface de débito primário.

A interface básica é constituída por dois canais de 64kbit/s, designados por canais B, e por um canal de 16kbit/s, designado por canal D. Esta interface é vulgarmente designada por S_0 ou por 2B+D, devido à sua estrutura de canais.

A interface primária é constituída por 30 canais B de 64kbit/s e por um canal D de 64kbit/s na versão europeia, sendo habitualmente designada por S_2 ou 30B+D. Na versão norte-americana, a interface de débito primário possui 23 canais B de 64kbit/s e um canal D de 64kbit/s, sendo designada por S_1 ou 23B+D.

Em ambas as interfaces os canais B permitem um débito de 64kbit/s, podendo ser utilizados para canais de transferência de informação de voz, áudio e informação digital sem restrições[6]. O canal D tem um débito de 16kbit/s na interface básica e de 64kbit/s na interface primária, sendo utilizado para sinalização e para dados em modo pacote.

Na interface primária estão também definidos o canal H0, constituído por 6 canais B (384kbit/s), e os canais H11 e H12, respectivamente constituídos por 24 canais B (1536kbit/s) e 30 canais B (1920kbit/s).

A limitação em termos de largura de banda da RDIS-be impõe restrições em relação à quantidade e ao tipo de serviços suportados. Serviços como o vídeo e a transferência de imagens de alta resolução, devido aos seus elevados débitos, não poderão ser ainda suportados pela RDIS.

2.7 Rede Digital com Integração de Serviços de Banda Larga

A evolução para a RDIS de Banda Larga (RDIS-BL) foi influenciada por vários factores, sendo o mais importante o aparecimento de um número elevado de serviços com requisitos diversos e por vezes ainda desconhecidos, associados à crescente solicitação de novos serviços pelo consumidor. Cada um destes serviços exige da rede a satisfação de requisitos muito diferentes dos exigidos às redes tradicionais, o que influenciou a necessidade de criação de uma rede

[6] Informação Digital sem Restrições indica que o canal é totalmente transparente à informação que veicula e, portanto não deve sofrer qualquer alteração na rede, tais como transcodificação, supressão de "silêncios", etc.

universal, concebida segundo princípios diferentes e capaz de suportar este grande número de serviços de forma integrada.

A RDIS-BL pretende assegurar uma integração total de serviços, não só no acesso, mas ao nível de toda a rede. O Modo de Transferência Assíncrono, assegura essa integração, garantindo além disso uma rede flexível, capaz de se adaptar a diferentes ritmos de comunicação, mantendo uma elevada eficiência dos recursos da rede para uma larga gama de serviços. Vários serviços foram considerados emergentes a quando a definição da RDIS-BL:

- Comunicação multimédia,
- Televisão digital de alta definição,
- Transferência de imagens de elevada resolução (e.g. imagens médicas),
- Pesquisa de conteúdos multimédia,
- Videoconferência.

As características principais do ATM são:

- modo de transferência orientado à ligação - estabelecem-se conexões sobre canais virtuais,
- informação encapsulada em pacotes (células) de tamanho fixo e reduzido,
- ligações estabelecidas através de sinalização,
- possibilidade de garantir qualidade de serviço (QoS),
- encaminhamento efectuado apenas uma vez no estabelecimento das conexões,
- estruturas de comutação simplificadas,
- reduzida complexidade de filas de espera e atrasos de empacotamento associados.

O modo de transferência assíncrono ATM será objecto de estudo detalhado no capítulo 3.

Síntese

Neste capítulo foi efectuada uma descrição sumária das principais redes de telecomunicações existentes e as tecnologias de suporte. As hierarquias digitais plesiócronas e síncrona constituem os principais suportes de transmissão digital

actualmente instalados e, é de crer que sejam utilizados durante alguns anos como suporte de transmissão das redes públicas de telecomunicações.

Após uma abordagens sobre os principais modos de comunicação, foram descritas as Redes Telefónicas, as Redes de Dados, as Redes baseadas nos protocolos TCP/IP e as principais Redes sem fios.

A evolução tecnológica e o aparecimento de um número elevado de novos serviços de telecomunicações conduzem à necessidade de uma cada vez maior integração de serviços, possibilitando uma maior economia de custos de desenvolvimento, manutenção e gestão. Neste contexto foram descritas as Redes Digitais com Integração de Serviços: a RDIS-be e a RDIS-BL. Esta última, sendo baseada no modo de transferência assíncrono ATM, será apresentada no capítulo seguinte, juntamente com outras tecnologias de suporte da arquitectura do sistema proposto

3

Tecnologias de comunicação para sistemas de controlo

As Redes de Área Local (LAN, *Local Area Network*) têm sido usadas com alguma popularidade no suporte de sistemas de controlo industrial como alternativa a soluções suportadas por ligações ponto-a-ponto. Deste modo, os custos de operação, manutenção e instalação tornaram-se mais reduzidos comparativamente às soluções tradicionais. Além dos aspectos económicos, o uso de LANs em sistemas de controlo industrial permite descentralizar as tarefas de controlo e gestão assim como possibilita a introdução de novas tecnologias neste tipo de aplicações.

Paralelamente ao desenvolvimento das LANs, em que o objectivo principal era a interligação de dispositivos informáticos, tais como computadores e seus periféricos associados, foram desenvolvidas outro tipo de redes dedicadas à interligação de sensores, actuadores e controladores. Este tipo de redes são vulgarmente designadas de barramentos de campo. Em regra, estes sistemas, que actualmente estão sujeitos a normalização internacional, evoluíram a partir de soluções proprietárias orientadas para aplicações específicas, pelo que apresentam algumas limitações, impeditivas da sua utilização em ambientes abertos, para interligação de um grande número de terminais de diferentes tipos e geograficamente dispersos.

A introdução da tecnologia ATM (ATM, *Asynchronous Transfer Mode*) como suporte das redes públicas de telecomunicações, designadamente da RDIS-BL (RDIS-BL, Rede Digital com Integração de Serviços de Banda Larga), poderá ser candidata a suportar este tipo de aplicações, com a vantagem de alargar a área geográfica de cobertura e permitir o suporte de

um maior número de dispositivos e sistemas, garantindo a Qualidade de Serviço (QoS, *Quality of Service*) de todas as aplicações.

3.1 Redes de Área Local

As secções seguintes fazem uma breve descrição dos principais conceitos relacionados com as redes de área local, abordando principalmente os aspectos de normalização, topologias e métodos de acesso ao meio físico de transmissão. Finalmente, é apresentada com maior detalhe, a norma Ethernet por ser o protocolo mais difundido e utilizado neste tipo de redes.

3.1.1 Normas IEEE 802

O IEEE normalizou, na série 802.3, as recomendações que são utilizadas nas LANs actuais. Estas normas estão em constante evolução de forma a permitir o funcionamento sobre um novo meio físico de transmissão ou de possibilitar a introdução de uma nova funcionalidade de comunicação. As novas extensões recebem uma letra para identificação e, quando o processo de normalização está completo, tornam-se parte da norma básica, não sendo mais publicadas como um suplemento separado. A Tabela 3-1 apresenta algumas extensões do IEEE 802.3.

Tabela 3-1: Extensões à norma 802.3 do IEEE.

Norma	Ano	Descrição
802.3a	1985	Ethernet 10BASE2 (cabo coaxial fino)
802.3c	1985	Especificações de repetidores a 10Mbit/s
802.3d	1987	Link de fibra FOIRL (FOIRL, *Fiber Optic Inter-Repeater Link*)
802.3i	1990	Par entrançado 10BASE-T
802.3j	1993	Fibra óptica 10BASE-F
802.3u	1995	Fast Ethernet 100BASE-T
802.3x	1997	Norma Ethernet Full-Duplex
802.3z	1998	Gigabit Ethernet 1000BASE-X
802.3ab	1999	Gigabit Ethernet - par entrançado 1000BASE-T
802.3ac	1998	TAG para VLAN e extensão do tamanho para 1 522 octetos
802.3ad	2000	Agregação de links paralelos
802.3ae	2002	10Gbit/s Ethernet.
802.3ah	2004	Ethernet in the First Mile

3.1.2 Topologias de redes locais

As ligações físicas entre os diversos nós de uma rede formam um grafo que define a sua topologia. A topologia de uma rede tem influência em vários factores tais como a operação, manutenção, facilidade de expansão e facilidade de detecção de nós em falha. As topologias básicas resumem-se a três: estrela, anel e barramento. A partir destas podem ser formadas topologias híbridas de que é exemplo a topologia em árvore.

Topologia em estrela

Na topologia em estrela, todas as estações da rede estão ligadas a um nó central. Essa ligação poderá ser efectuada através dum canal bidireccional ou de dois canais uni-direccionais. A Figura 3-1 mostra esse tipo de topologia.
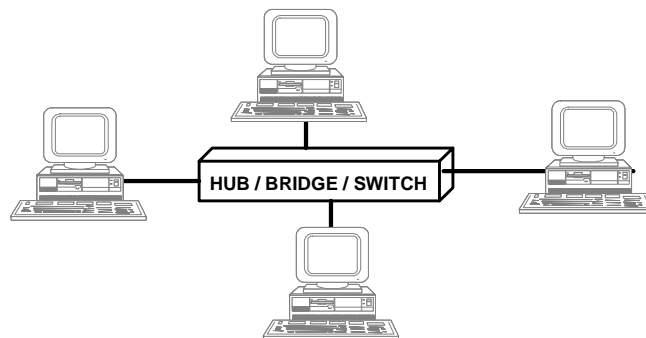
Figura 3-1: Topologia em estrela.

O desempenho duma rede com esta topologia depende das funções executadas pelo nó central. Algumas destas funções são descritas a seguir:

- Interligação directa entre estações: quando uma estação deseja transmitir, envia um pedido de ligação ao nó central, especificando o nó destino. O nó central estabelece então uma ligação entre as duas estações,
- Estrela activa: o nó central executa duas funções principais:
    - Regenera e temporiza os sinais gerados num nó qualquer para ser transmitido a um ou mais nós,

- Detecta colisões originadas em transmissões simultâneas de dois ou mais nós. Quando isso acontece, o nó central envia um sinal de colisão a todas as outras estações (ou memoriza um dos sinais).

A topologia em estrela é típica de redes telefónicas, em que a central concentra milhares de pares de fios num só local. Nas redes locais, a topologia em estrela está já bastante difundida, possuindo as seguintes vantagens:

- Uma interrupção no cabo que liga a estação ao concentrador central não provoca a falha da rede; apenas afecta a estação cujo cabo está em falha,
- Permite a gestão centralizada da rede,
- Permite a utilização de qualquer meio físico.

No entanto, o componente central da estrela é bastante crítico e, na falha deste, toda a rede falha. Em alguns casos, é mantido um equipamento igual de reserva para garantir a rapidez na manutenção da rede em caso de falha.

Topologia em anel

A topologia em anel consiste num conjunto de ligações ponto-a-ponto entre repetidores em que o último está ligado ao primeiro, formando um anel fechado. A informação circula de uma forma unidireccional no interior do anel, conforme mostra a Figura 3-2. Cada estação está ligada à rede através de um repetidor. Existem redes onde a transmissão é bidireccional, com um canal físico específico para cada transmissão como por exemplo a norma FDDI (FDDI, *Fiber Distributed Data Interface*).
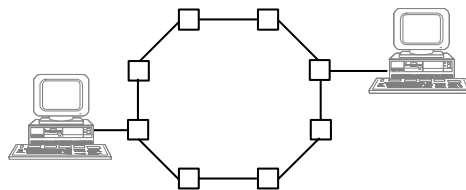
Figura 3-2: Topologia em anel.

Um exemplo duma rede local em anel é a *Token Ring*, onde a estação que deseja transmitir deve esperar a sua vez e então enviar a mensagem ao anel, na forma de um pacote que possui, entre outras informações, o endereço fonte e destino da mensagem. Quando o pacote chega ao destino, os dados são copiados para uma memória auxiliar local e o pacote

prossegue através do anel até chegar novamente à estação de origem, que é responsável por removê-lo de circulação. Em alguns casos cada nó possui um repetidor regenerador de mensagens, permitindo às redes que utilizam essa característica obterem uma distância superior entre cada nó.

Em redes locais, como cada nó participa no processo de transmissão de qualquer mensagem que circule na rede, a fiabilidade do conjunto depende da fiabilidade de todos os nós, sendo necessário introduzir mecanismos de protecção para eliminar automaticamente, do anel, nós que possuam falhas, de forma a que essa situação não afecte todo o sistema (e.g. redes FDDI). Na prática, as redes em anel geralmente são interligadas fisicamente na forma de uma estrela, devido às melhores características de segurança desta topologia.

Topologia em barramento

Numa topologia em barramento, tudo que é transmitido por uma estação é "visto" por todos os outros nós quase simultaneamente. Deste modo, estamos em presença de um canal do tipo *broadcast*. A Figura 3-3 ilustra a topologia em barramento.
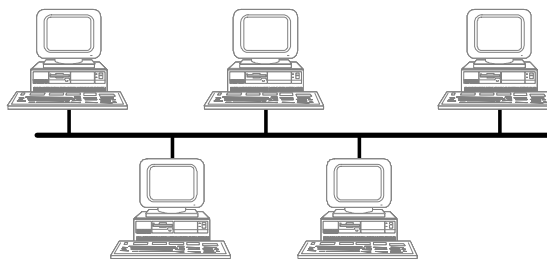
Figura 3-3: Topologia em barramento.

Nesta topologia, existem dois métodos principais de controlo de acesso ao meio:

- Método determinístico: consiste em passar um *token* de nó em nó, sendo que só pode transmitir a estação que possui o *token* (usado, por exemplo, nas redes Token Bus – IEEE 802.4),
- Método aleatório: qualquer estação pode transmitir quando a rede está livre. É possível ocorrerem colisões se duas ou mais estações detectarem a rede livre e começarem a transmitir quase simultaneamente. Neste caso, as estações que detectam a colisão, interrompem imediatamente a transmissão e efectuam nova tentativa passado um tempo aleatório após a colisão. Este é o método utilizado pelas redes Ethernet, através do

algoritmo CSMA-CD (CSMA-CD, *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*), que será analisado com mais detalhe na próxima secção.

3.1.3 Métodos de acesso ao meio

Nesta secção são analisados, duma forma geral, as duas principais categorias de protocolos existentes: com colisão e sem colisão, ou seja, quando se aceita a existência de colisões ou quando se evita que elas ocorram.

3.1.3.1 Com detecção de colisão: CSMA-CD

O problema principal das redes locais tem a ver com a comunicação entre várias estações que partilham um mesmo meio físico (canal *broadcast*), em que as mensagens enviadas por uma estação devem chegar à estação de destino sem interferir nas aplicações das outras estações.

O protocolo, denominado CSMA-CD, que é largamente utilizado em redes locais (e.g. Ethernet), é um protocolo simples e que pode ser descrito resumidamente na sequência abaixo:

1. Todas as estações estão continuamente a "ouvir" o barramento com o objectivo de detectar se alguma mensagem lhes foi enviada,
2. Caso exista a necessidade duma estação transmitir, primeiro verifica se o barramento está livre (sem transmissão de dados). Caso isso se verifique, a estação transmite a mensagem; caso contrário, espera até que o barramento fique livre,
3. Se duas estações começarem a transmitir praticamente no mesmo instante (ambas admitiram que o barramento estava livre), ocorre uma colisão entre as tramas das duas estações e os dados tornam-se inválidos. Nesse momento, a estação que detectou a colisão pára de transmitir a mensagem e aguarda um tempo aleatório. Quando esse tempo se esgotar, repete o processo, verificando se o barramento está livre e assim sucessivamente.

A estação detecta a colisão comparando os dados que enviou com os dados que circulam no barramento. Caso sejam diferentes significa que ocorreu uma colisão.

A colisão é um processo normal nas redes Ethernet e é resolvido em micro segundos, pois as estações envolvidas no processo esperam um tempo aleatório para retransmitir a trama de

dados. Este método garante uma adaptação automática dependendo da carga na rede. Quando uma colisão é detectada, o *transceiver* envia um sinal a avisar a interface de rede. Se a colisão é detectada no início da trama, a interface espera até o preâmbulo ter sido completamente transmitido, enviando para a rede um sinal de 4 octetos indicando colisão (*jam signal*) [Spu00]. Nesse ponto, a interface interrompe a transmissão e entra num processo de recuperação de colisão, esperando um tempo aleatório para tentar novamente.

O tempo aleatório que é esperado pelas estações obedece a um algoritmo conhecido como "*truncated binary exponential backoff*", que funciona da seguinte forma: após a primeira colisão, a estação espera um tempo aleatório equivalente a 0 ou 1 períodos de contenção. Caso transmita e ocorra nova colisão, a estação espera de 0 a 3 períodos de contenção, e assim sucessivamente enquanto ocorrer colisão (o período aleatório varia de 0 a 2n - 1). Se ocorrerem 10 colisões seguidas, o intervalo aleatório é fixado num máximo de 1023 períodos de contenção. Se acontecerem 16 colisões seguidas, é reportado um erro para a estação que está a tentar transmitir [Spu00].

O tempo de contenção é definido como duas vezes o tempo que a mensagem leva para se propagar de um extremo ao outro do condutor, ou seja, é o equivalente a 64 octetos [Spu00]. De notar que a duração de um bit é diferente dependendo da velocidade da rede Ethernet, sendo de 100ns para 10Mbit/s e 10ns para 100Mbit/s. O tempo de contenção significa o máximo tempo que uma estação demora a detectar se houve colisão na sua mensagem. Assim, passado esse tempo, a estação tem certeza que não sofrerá interferência de outras estações. Por exemplo, suponhamos uma estação num extremo do cabo a iniciar uma transmissão no instante t_0. Algum tempo depois (δ), os primeiros bits da mensagem vão atingir a extremidade oposta do cabo. Se uma segunda estação na extremidade oposta do cabo "ouvir" o meio físico um pequeno instante antes de $t_0 + \delta$, vai achar que o meio está livre e começará a sua transmissão. A segunda estação vai detectar quase imediatamente a colisão, mas a primeira estação só vai detectar essa colisão quando os bits enviados pela segunda tiverem chegado ($t_0 + \delta + \delta$). É por esta razão que o tempo de contenção é igual a 2δ.

A Tabela 3-2 mostra os tempos de espera da interface de rede de 10Mbit/s no caso de colisão [Spu00].

Uma estação não transmite vários pacotes intermitentemente, sendo obrigada a esperar um tempo conhecido como IFG (IFG, *Inter Frame Gap*), equivalente a 12 octetos. Esta medida serve para libertar o meio físico e permitir que outras estações também possam enviar seus pacotes.

Tabela 3-2: Tempos de espera na interface de rede Ethernet a 10Mbit/s no caso de colisão.

Número de Colisões	Números aleatórios	Tempo aleatório
1	0...1	0...51,2 µs
2	0...2	0...153,6 µs
3	0...7	0...358,4 µs
4	0...15	0...768 µs
5	0...31	0...1,59 ms
6	0...63	0...3,23 ms
7	0...127	0...6,50 ms
8	0...255	0...13,1 ms
9	0...511	0...26,2 ms
10-15	0...1023	0...52,4 ms
16	N/A	Descarta trama

3.1.3.2 Sem Colisão (utilização de token)

Além dos protocolos que permitem a existência de colisões, existem outros em que as mesmas não ocorrem, em que o objectivo é aumentar o desempenho da rede, principalmente em situações de carga elevada.

Um desses métodos é baseado na circulação de um *token*, utilizado pelas redes *Token Ring* e *Token Bus*, que possuem topologias em anel e barramento, respectivamente. Neste método, existe uma entidade especial denominada *token*, que circula entre as estações da rede. Somente a estação que possui o *token* pode a transmitir e, como existe apenas um *token* a circular na rede, não ocorrem colisões.

Quando uma estação quer transmitir uma mensagem, ela deve aguardar a chegada de um *token* livre. Seguidamente, deve retirá-lo de circulação e enviar a sua mensagem. Após a transmissão de uma mensagem, a estação deve gerar um *token* livre para a rede de modo a que as outras estações possam transmitir.

Para diminuir o tempo que uma estação tem de esperar por um *token* livre, existe uma alternativa designada por "*Early Token Release*", que permite a uma estação libertar o *token* logo após ter terminado a sua transmissão, sem esperar o retorno do pacote anterior.

Existem redes que permitem a existência de mais do que um *token* a circular na rede em simultâneo (e.g. redes FDDI).

3.1.4 IEEE 802.3 e Ethernet

Nesta secção, é apresentado com mais detalhe o protocolo IEEE 802.3 e as suas extensões u e z que correspondem, respectivamente, às redes Fast Ethernet e Gigabit Ethernet.

Ethernet

- **Características Gerais**

A rede Ethernet consiste num conjunto de recomendações que especificam as camadas física e de ligação de dados, para um débito de 10Mbit/s, com tramas que possuem um tamanho compreendido entre 64 e 1518 octetos. O endereçamento é efectuado através de uma numeração, que é única para cada estação, e composta por seis octetos, sendo os primeiros três para a identificação do fabricante e os três seguintes para o número sequencial da estação. Esta numeração é conhecida como endereço MAC (MAC, *Medium Access Control*).

A subcamada MAC, pertencente à camada 2 da estrutura de protocolos do modelo OSI, controla a transmissão, a recepção e especifica as características do meio físico; consequentemente cada tipo de meio físico requer características diferentes da camada MAC.

As características principais da subcamada MAC são:

- Modo de transmissão half-duplex, evoluindo para full-duplex,
- Encapsulamento dos dados das camadas superiores,
- Desencapsulamento dos dados para as camadas superiores,
- Transmissão de tramas,
- Recepção de tramas.

- **Controlo de Acesso ao Meio**

O modo de transmissão em half-duplex requer que apenas uma estação transmita enquanto todas as outras aguardam em "silêncio". O controlo deste processo fica a cargo do método de acesso CSMA-CD descrito na secção 3.1.3.1.

- **Tipos de Cabos e Topologias**

Os principais cabos utilizados são:

- Coaxial fino,

- Coaxial grosso,
- Par entrançado sem blindagem.

As topologias suportadas são:

- Barramento: utilizando cabos coaxiais fino ou grosso,
- Estrela: utilizando cabos de par entrançado sem blindagem,
- Árvore: combinação das anteriores.

- **Formato da Trama Ethernet**

Antes de apresentar o formato da trama, convém lembrar que este protocolo pertence à subcamada MAC da camada de ligação de dados do modelo OSI. A Figura 3-4 ilustra a sua estrutura.

IFG (12 octetos)	Preâmbulo (7 octetos)	DI (1)	Endereço destino (6 octetos)	Endereço origem (6 octetos)	Tam (2)	Informação (46-1500 octetos)	CRC (4 octetos)
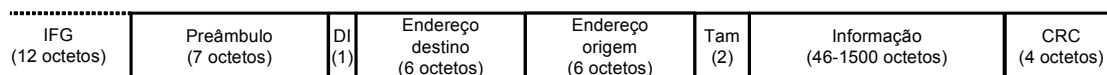
Figura 3-4: Formato duma trama MAC do protocolo Ethernet.

O tamanho máximo duma trama é de 1530 octetos. Quando uma estação pretender enviar dois pacotes consecutivos, deverá esperar um tempo chamado IFG equivalente a 12 octetos. Esta medida serve para libertar o meio físico e permitir que outras estações também possam transmitir as suas tramas. A definição de cada campo da trama é feita a seguir:

- Preâmbulo: é uma sequência de 7 octetos para sincronização entre emissor e receptor. Cada octeto é constituído pelo padrão de bits "10101010". A codificação *Manchester* para esse padrão produz uma onda quadrada de 10MHz durante 5,6μs,
- Delimitador Inicial da trama (DI): é um octeto com o padrão "10101011", indicando o início da trama,
- Endereço de destino e endereço de origem: cada trama contém um campo de 6 octetos que indica o endereço da estação de destino e outro que indica o endereço da estação de origem da informação. A norma prevê endereços de 2 ou 6 octetos mas o protocolo Ethernet utiliza somente endereços de 6 octetos. O bit mais significativo do endereço destino é "0" para endereços normais e "1" para endereços de grupo. Endereços de grupo permitem que várias estações “escutem” o meio de transmissão através do mesmo

endereço. Quando uma trama é enviada para um endereço desse tipo, todas as estações pertencentes àquele grupo a recebem. Enviar uma mensagem para um endereço de grupo é chamado *multicasting*. Um endereço com todos os bits a "1" é denominado *broadcast*, e é destinado a todas as estações da rede,

- Tam: tamanho do campo de dados (IEEE 802.3) ou tipo do protocolo de nível superior (Ethernet II): indica o número de octetos de dados que serão transmitidos por essa trama. O mínimo é 0 e o máximo é 1500,
- Informação: corresponde à informação útil a ser transmitida,
- CRC: o CRC (CRC, *Cyclic Redundancy Check*), é um dos algoritmos mais eficazes para detectar erros na transmissão. O polinómio gerador do CRC para o protocolo Ethernet é:

$$G(x) = x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^{8} + x^{7} + x^{5} + x^{4} + x^{2} + x + 1.$$

O tamanho mínimo de uma trama é de 64 octetos, por dois motivos principais:

1. Prevenir o facto de uma estação terminar a transmissão de uma trama curta antes do primeiro bit alcançar o final do cabo, o que faria com que uma eventual colisão não fosse detectada,

2. Quando uma estação detecta uma colisão, ela "trunca" a trama que está a transmitir de modo a libertar o barramento o mais rápido possível. Assim, é normal aparecer "lixo" ou pedaços de tramas no cabo. O tamanho mínimo de 64 octetos permite uma maior facilidade na detecção de tramas válidas e "lixo".

Fast Ethernet

- **Características Gerais**

A norma Fast Ethernet manteve as características essenciais da norma Ethernet no que diz respeito ao endereçamento, ao formato da trama e ao mecanismo de detecção de erro. As diferenças mais significativas em relação à norma Ethernet são o aumento do débito de transmissão - 100Mbit/s e o modo de transmissão que pode ser half-duplex ou full-duplex.

No modo de operação half-duplex não ocorreram modificações no método de acesso (CSMA-CD). No entanto, no modo full-duplex foram efectuadas as seguintes modificações:

- Criação de *pause frames* - tramas que a estação que está a receber informação envia à estação de origem para a avisar que deve interromper a transmissão durante um dado período de tempo,

- Enquanto que na norma Ethernet uma estação não podia transmitir e receber informação ao mesmo tempo, na norma Fast Ethernet isso já é possível,
- Não é necessário esperar o "silêncio" da linha para transmitir - a transmissão é efectuada quando o receptor está apto a receber informação,
- Aumento da largura de banda (200Mbit/s).

- **Tipos de Cabos e Topologias**

Os cabos que podem ser utilizados são:

- Coaxial fino,
- Par entrançado sem blindagem,
- Fibra óptica - multimodo e monomodo.

As topologias suportadas são:

- Barramento: utilizando cabo coaxial fino,
- Estrela: utilizando cabos de par entrançado sem blindagem.

Gigabit Ethernet

- **Características Gerais**

O Gigabit Ethernet foi desenvolvido com o objectivo de manter a compatibilidade com a base instalada de dispositivos Ethernet e Fast Ethernet. O débito de transmissão é de 1Gbit/s e, na sua essência, segue a norma Ethernet e aceita o modo de transmissão half-duplex e full-duplex. Foram necessárias efectuar algumas mudanças para permitir o suporte do modo half-duplex.

- **Transmissão em Half-Duplex**

No caso do full-duplex, o formato do pacote é exactamente igual ao Ethernet original (e também ao Fast Ethernet). Porém, no half-duplex isso daria problemas, principalmente na detecção de colisões em tramas de tamanho mínimo. As tramas MAC têm um tamanho mínimo de 64 octetos de modo a prevenir que uma estação complete a transmissão de uma trama antes de o primeiro bit chegar ao ponto mais distante do cabo (onde poderá colidir com outra trama) e retornar à estação, de forma a ser detectada a colisão (tempo conhecido como 2δ). Assim, o

tempo mínimo para detectar uma colisão é o tempo gasto pelo sinal ao propagar-se de um extremo do cabo para o extremo oposto e retornar à origem. Este tempo mínimo é denominado s*lot-time*.

O comprimento máximo permitido para um cabo Ethernet 10BASE5 é 2,5km (com um máximo de 4 repetidores). No Gigabit Ethernet, como a taxa de transmissão aumenta, o emissor transmite a trama mais rapidamente. Deste modo, mantendo o tamanho de trama e o comprimento do cabo, a estação pode transmitir uma trama mais rapidamente e não detectar uma colisão que ocorreu no outro extremo do cabo. No sentido de resolver este problema, podem ser consideradas duas abordagens:

1. Manter o comprimento máximo de cabo e aumentar o *slot-time* (aumentar o tamanho mínimo da trama),
2. Manter o mesmo *slot-time* e reduzir o comprimento de cabo.

O Gigabit Ethernet mantém o tamanho mínimo e máximo das tramas Ethernet. Considerando que o Gigabit Ethernet é 10 vezes mais rápido que o Fast Ethernet, para manter o mesmo tempo de *slot* o comprimento máximo de cabo deveria ser reduzido cerca de 10 vezes, o que seria problemático. Em vez disso, é usado um tamanho de *slot* de 512 octetos no half-duplex. Para manter a compatibilidade com o Ethernet original, o tamanho mínimo de trama não é aumentado, mas sim o tempo de portadora na linha. Se a trama for menor que 512 octetos, são adicionados no fim os chamados símbolos de extensão. Estes símbolos especiais são denominados *carrier extensions*. A Figura 3-5 ilustra este procedimento.
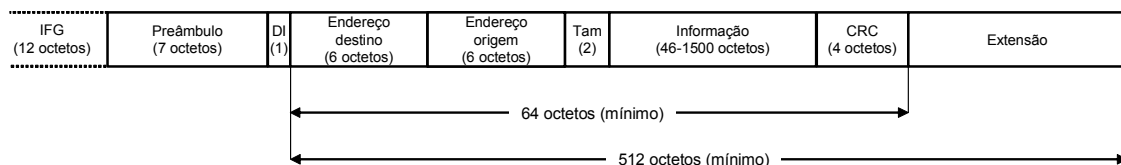
Figura 3-5: Formato duma trama MAC com *carrier extensions*.

Este método consiste numa solução simples, mas que desperdiça largura de banda principalmente para tramas pequenas (no pior caso, são enviados 448 octetos de extensão), o que pode conduzir a uma baixa eficiência na transmissão de dados. Para pacotes pequenos, a eficiência é pouco melhor que na Fast Ethernet.

Outra mudança foi a introdução de *frame bursts*; processo através do qual uma estação pode transmitir vários pacotes para o meio físico sem perder o controlo de acesso ao meio. A transmissão em rajada é feita através do preenchimento do espaço entre as tramas com bits de informação, de maneira a que o meio físico não fique livre para as outras estações transmitirem. Com este método consegue-se um aumento substancial na eficiência de transmissão.

- **Transmissão em Full-Duplex**

O funcionamento do Gigabit Ethernet em modo full-duplex permite aumentar a banda de 1Gbit/s para 2Gbit/s, aumentar a distância e eliminar as colisões. O controlo de acesso ao meio já não é efectuado pelo CSMA-CD mas sim por um mecanismo de controlo de fluxo.

Esse mecanismo deve ser utilizado em ligações ponto-a-ponto. Quando a estação receptora fica congestionada, envia uma trama denominada *pause-frame* que indica que seja interrompido o envio de dados durante um intervalo de tempo específico. A estação que estava a transmitir aguarda o tempo indicado e reinicia a transmissão, ou a estação receptora envia um outro pacote com time-to-wait igual a zero e instruções para recomeçar o envio de informação.

- **Tipos de Cabos e Topologias**

Os cabos que podem ser utilizados são:

- Coaxial fino,
- Par entrançado sem blindagem,
- Fibra óptica - monomodo e multimodo.

As topologias suportadas são:

- Barramento: utilizando cabo coaxial fino,
- Estrela: utilizando cabos de par entrançado sem blindagem,
- Árvore: combinação das anteriores.

3.1.5 Comparação dos vários padrões Ethernet

O aumento da utilização da banda disponível, a necessidade de garantir qualidade de serviço, a mudança no perfil do tráfego, entre outros factores, impulsionaram a evolução da Ethernet. No entanto, as mudanças introduzidas não se limitaram apenas ao aumento do débito; aconteceram mudanças no meio físico e em outros aspectos funcionais do protocolo.

O aumento da utilização da largura de banda disponível, com a introdução de aplicações de voz e vídeo, provocou um decréscimo na eficiência da rede, o que motivou a necessidade do aumento da largura de banda para melhorar a qualidade de transmissão.

O meio físico sofreu também alterações, com a introdução de novos materiais (e.g. fibras ópticas). A Tabela 3-3 mostra a evolução das distâncias permitidas juntamente com o aumento da taxa de transmissão.

Tabela 3-3: Comparação dos vários padrões Ethernet.

	Ethernet 10BaseT	**Fast Ethernet 100BaseT**	**Gigabit Ethernet 1000Base x**
Débito	**10Mbit/s**	**100Mbit/s**	**1000Mbit/s**
Categoria 5 UTP	2500m	210m	25m
STP / Coaxial	500m	100m	25m
Fibra Multimodo	2km	412m (half-duplex) 2km (full-duplex)	550m
Fibra Monomodo	25km	20km	5km

3.2 Barramentos de Campo

As redes industriais, vulgarmente designadas por Barramentos de Campo, são redes locais simplificadas do ponto de vista da dimensão, formato de tramas de dados e capacidade de transmissão. Por outro lado, possuem outras características e mecanismos de modo a suportarem a comunicação em tempo real entre dispositivos tais como PLCs (PLCs, *Programmable Logic Controllers*), Sensores e Actuadores.

Os Barramentos de Campo são largamente utilizados para o suporte de sistemas controlados por computador distribuídos (DCCS, *Distributed Computer–Controlled Systems*), em aplicações que vão desde o controlo de processos até à automação industrial [Tov99]. Habitualmente, os

DCCS impõem requisitos de tempo-real à rede de comunicação, segundo os quais as mensagens devem ser enviadas e recebidas num tempo inferior a um determinado limite, caso contrário diz-se que ocorreu uma falha temporal. Este facto tem motivado a utilização de redes de comunicação, para as quais o protocolo de controlo de acesso ao meio é capaz de escalonar as mensagens de acordo com os seus requisitos de tempo-real.

Quando comparados com outras redes, os Barramentos de Campo devem satisfazer vários requisitos. Segundo [Pim90], os requisitos impostos por aplicações suportadas nestas redes são:

- capacidade de suporte de transmissão de mensagens curtas de forma eficiente. Adicionar 60 octetos de *overhead* a cada 2 de informação é claramente ineficiente do ponto de vista do aproveitamento da capacidade de transmissão,
- capacidade de suporte de tráfego periódico e aperiódico. O tráfego periódico está normalmente associado a informação resultante de processos de amostragem e o tráfego aperiódico é normalmente gerado por situações ocasionais tais como sinais de alarme gerados como consequência de falhas em dispositivos,
- protecção contra falhas isoladas. O projecto destas redes deve assegurar um nível mínimo de redundância de modo a prevenir que a falha de um dispositivo não provoque a falha da rede (e.g. cabos e controladores),
- baixos custos de interface. Este requisito implica o uso de comunicações série em topologias do tipo barramento ou estrela de modo a reduzir os custos de cablagem e o uso de protocolos que conduzam a implementações simples e de baixo custo.

O modelo OSI (OSI, *Open Systems Interconnection*) da ISO (ISO, *International Standards Institute*) especifica uma estrutura modular em sete camadas de modo a permitir uma elevada flexibilidade e interoperacionalidade entre os vários sistemas de comunicação. No entanto, esta estrutura acarreta um aumento da quantidade de processamento e do *overhead* necessário ao suporte dos diversos formatos de informação associados a cada uma das camadas. Deste modo, os Barramentos de Campo implementam apenas um estrutura baseada em três camadas: Física, Ligação de dados e Aplicação, sendo esta última modificada de modo a aceder directamente à camada de Ligação de dados.

Embora sejam definidas apenas estas três camadas, não significa que as funcionalidades associadas às camadas suprimidas não sejam implementadas. A interoperacionalidade entre equipamento heterogéneo só é conseguido através de alguma funcionalidade na camada de Apresentação. O controlo extremo-a-extremo assim como a segmentação e reunião de

mensagens são funções da camada de Transporte e o uso de *routers* para interligar diversos Barramentos de Campo necessitam de funcionalidades ao nível da camada de Rede. Estas funcionalidades existem em muitos Barramentos de Campo mas estão todas implementadas na camada de Aplicação.

A área das redes industriais encontrava-se inicialmente dominada por soluções proprietárias, as quais estavam frequentemente orientadas para áreas de aplicação específicas. Mais recentemente, redes industriais normalizadas começaram a ser utilizadas com maior frequência. Uma particular relevância deve ser dada à norma Europeia EN 50170 [EN96] que congrega três redes industriais largamente utilizadas: P-NET [DS90], PROFIBUS [DIN91] e WorldFIP [NF89].

No entanto, devido às suas características, o protocolo CAN (CAN, *Controller Area Network*) [ISO93], combinado com um protocolo de alto nível tal como o DeviceNet [Roc98] é também adequado ao suporte de aplicações DCCS.

Assim, nas secções seguintes, serão apresentadas as características principais dos protocolos CAN e PROFIBUS e duma forma mais resumida os protocolos P-NET e WorldFIP.

3.2.1 CAN – Controller Area Network

O protocolo CAN foi desenvolvido pela Bosch [ISO93] com o intuito original de resolver as necessidades de interligação dos vários dispositivos electrónicos existentes em veículos automóveis e assim reduzir a quantidade de cablagem associada. É suportado através de um barramento série (*broadcast bus*) onde são ligados os diversos controladores. O CAN foi normalizado pela ISO em 1993 e existe implementado, em larga escala, em diversos produtos comerciais. Comparando os requisitos gerais das Redes Industriais com os deste protocolo, identificam-se um grande número de características que o tornam adequado a aplicações industriais, de entre as quais se destacam:

- o baixo custo,
- a imunidade ao ruído em ambientes eléctricos hostis,
- o suporte de aplicações de tempo real,
- a sua fácil configuração.

Características principais do protocolo CAN

A estrutura de protocolos, de acordo com o Modelo OSI, define apenas parte das camadas Física e de Ligação de Dados. Ao nível da camada de Aplicação existem várias soluções implementadas (embora também possam existir soluções proprietárias), de que se destacam:

- CAL (CAL, *CAN Application Layer*) da CiA (CAN in Automation) [CiA95],
- SDS (*Smart Distributed System*) da Honeywell [Hon99],
- DeviceNet da Allen Bradley [Roc98].

A camada Física é responsável pela transferência de bits entre os diversos nós da rede, definindo os requisitos de temporização, codificação e sincronização.

A Figura 3-6 ilustra a forma como são ligados os vários módulos ao barramento CAN. Consiste num par diferencial onde os diversos módulos estão ligados em "colector aberto", com terminação (R_L=120Ω) em ambos os extremos do barramento.
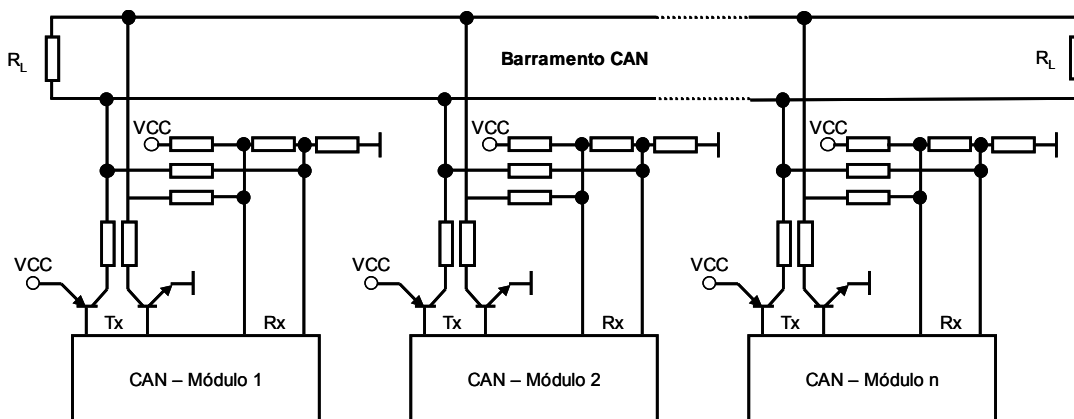
Figura 3-6: Interligação eléctrica entre os diversos módulos CAN.

O barramento a dois fios (CAN_H e CAN_L) pode estar em um de dois estados: activo (estado dominante) e passivo (estado recessivo). No estado recessivo (Valor lógico "1"), os níveis de tensão nas duas linhas são aproximadamente iguais (i.e. 2,5V). No estado dominante (Valor lógico "0"), o nível de tensão na linha CAN_H é de 3,5V, enquanto o nível de CAN_L é de 1,5V.

O receptor usa um método chamado *Wired AND* que permite a mudança do valor lógico "1" (recessivo) por outro receptor para o valor lógico "0" (dominante). Esta característica permite a confirmação das mensagens recebidas e o controlo de erros.

Os bits são codificados em NRZ (NRZ, *Non-Return-to-Zero*) e o comprimento do barramento depende do débito binário. Por exemplo, para um comprimento do barramento de 40m, o débito máximo de transmissão é de 1Mbit/s; para um comprimento de 1000m o débito máximo é de 50kbit/s.

A camada de Ligação de Dados implementa um mecanismo de disseminação dos chamados "Objectos de Comunicação" [Ruf97]. A informação a ser transmitida é encapsulada em pacotes de informação e é atribuído um identificador único a cada um destes objectos. Este identificador não especifica o destino dos pacotes mas sim a especificidade de informação que transportam (e.g. temperatura, pressão, humidade). Cada receptor decide se a informação transportada no barramento é relevante ou não, aceitando-a ou ignorando-a. Deste modo, evita-se o uso de endereçamento.

O CAN implementa um mecanismo de acesso ao meio (MAC, *Medium Access Control*) do tipo CSMA-CA (CSMA-CA, *Carrier Sense Multiple Access – Collision Avoidance*), em que para cada estação poder aceder ao meio (barramento) basta que este esteja livre. No entanto, ao contrário das redes Ethernet, o mecanismo de resolução de colisões é do tipo não-destrutivo, ou seja, uma das mensagens transmitida é sempre bem sucedida.

Ao nível da subcamada MAC existem 4 tipos de tramas:

- **Data-frame**: transportam a informação do emissor para o receptor,
- **Remote-frame**: usadas para solicitar a transmissão de uma Data-frame específica,
- **Error-frame**: são transmitidas por qualquer nó que detecte um erro no barramento,
- **Overload-frame**: usadas para solicitar o aumento do intervalo de tempo entre tramas sucessivas, ou seja, solicitar a diminuição do débito de informação no barramento.

A estrutura de uma trama de dados é ilustrada na Figura 3-7.
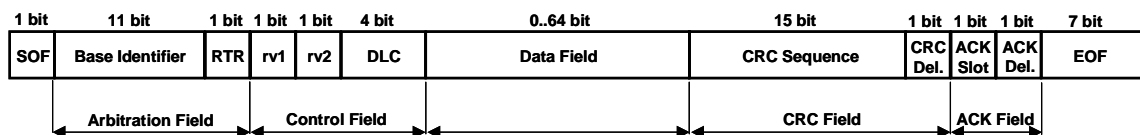
Figura 3-7: Formato de uma trama de dados CAN (CAN Data-Frame).

- **SOF** - Start Of Frame – Indica o início da trama ("0"),

- **Base Identifier** – sequência de 11 bits que permite identificar, de uma forma unívoca, uma dada mensagem,
- **RTR** – Remote Transmission Request – Permite distinguir as Data-frames (RTR="0") das Remote-frames (RTR="1"),
- **Control Field** – É composto pelos bits rv1 e rv2 e pelo campo DLC (*Data Length Code*). Os primeiros estão reservados para futura normalização (rv1=rv2="0") e são seguidos por 4 bits do campo DLC que podem assumir um valor binário dentro do intervalo [0..8] e indicam o comprimento do campo de dados Data-Field,
- **Data Field** – Este campo transporta os dados a serem transmitidos. O seu comprimento varia entre 0 e 8 octetos, de acordo com o campo DLC descrito anteriormente,
- **CRC Field** – É composto por uma sequência de 15 bits de um código cíclico redundante (CRC, *Cyclic Redundancy Code*), usado pelos receptores para verificar a integridade das tramas recebidas, seguido de um bit – CRC Delimiter ("1"),
- **ACK Field** – É composto por dois bits: o ACK Slot e o ACK Delimiter ("1"). O primeiro é enviado pelo emissor ("1") e alterado pelo receptor ("0") após a recepção da trama sem erros no campo CRC,
- **EOF** – End of Frame – sequência fixa de 7 bits ("1").

O comprimento do Base Identifier é alargado de 11 para 29 bits na especificação [ISO95], mantendo a compatibilidade com a especificação original.

O identificador tem duas funções, sendo a primeira a de especificar o conteúdo de um fluxo de mensagens relacionado, por exemplo, a leitura remota de uma variável de um determinado processo e a segunda a de implementar um mecanismo de prioridades usado na resolução das colisões.

O mecanismo de resolução de colisões é baseado no campo *Arbitration Field* e funciona da seguinte maneira: quando o barramento está livre, todas as estações com informação pendente iniciam a transmissão. Durante a transmissão do *Identifier Field*, se uma estação está a transmitir um "1" e lê um "0", significa que houve uma colisão com, pelo menos, uma mensagem de mais alta prioridade, e consequentemente esta estação suspende a transmissão. A mensagem de mais alta prioridade continua a ser transmitida sem "perceber" que houve

colisões e como tal é transmitida com sucesso. Para ilustrar este mecanismo [Tov99] considere-se o conjunto de mensagens ilustrado no exemplo da Tabela 3-4.

Tabela 3-4: Exemplo de uma sequência de mensagens CAN.

Mensagem	Identifier Field
A	01000111111
B	01000011111
C	01000001111
D	01000000111

A Figura 3-8 ilustra como é efectuado o mecanismo de resolução de colisões. De notar que, entre duas tramas com identificadores diferentes, o de mais alta prioridade é aquele que apresenta o identificador de valor binário mais baixo.
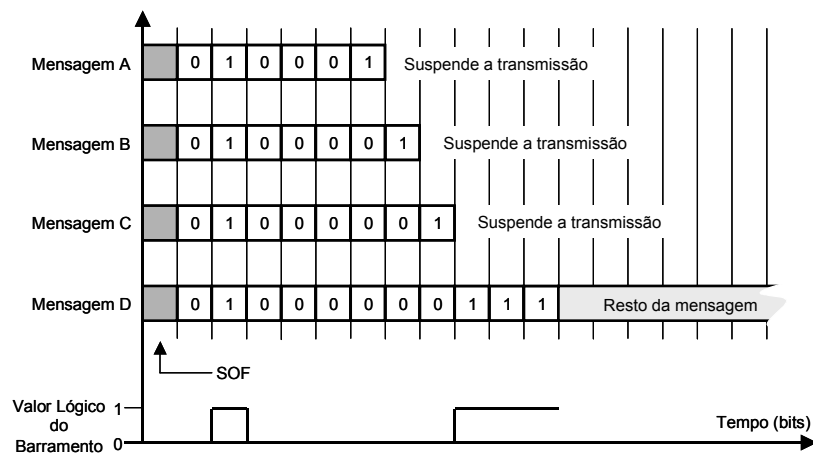
Figura 3-8: Mecanismo de resolução de colisões do protocolo CAN.

No caso de serem transmitidas simultaneamente uma Data-Frame e uma Remote-Frame, com o mesmo identificador, a Data-Frame tem prioridade mais alta. Essa distinção é feita através do bit RTR. Para tal, num dado sistema, a cada tipo de mensagem deve ser atribuído um único identificador – uma Data-Frame com um dado identificador e um DLC diferente de zero pode apenas ser transmitido por um nó.

As Remote-Frames apenas podem ser transmitidas com um DLC igual ao da Data-Frame correspondente. As transmissões simultâneas de Remote-Frames com identificadores iguais e DLCs diferentes provocam colisões sem resolução.

3.2.2 PROFIBUS, Process FieldBus

O protocolo PROFIBUS [DIN91] é uma norma Alemã usada para comunicações digitais em Barramentos de Campo. Esta norma foi desenvolvida pelo projecto *Fieldbus*, parcialmente financiado pelo Ministério Alemão de Investigação e Tecnologia, em que participaram empresas de automação e institutos de ciência e tecnologia.

Este protocolo é actualmente adoptado por centenas de fabricantes e usado em milhares de aplicações em todo o mundo. Existe uma entidade - PNO (PROFIBUS Nutzerorganisation e. V.) [PRO94], responsável por regular o desenvolvimento de novos produtos garantindo, por um lado, a abertura desta tecnologia a novos fabricantes e, por outro, mantendo-a independente de soluções proprietárias.

Características principais do protocolo PROFIBUS

O protocolo PROFIBUS especifica as camadas 1, 2 e 7 do modelo OSI. As camadas 1 e 2 são especificadas na norma DIN 19245, Partes 1 e 2 [DIN91]. A camada 2 é também referida como FDL (FDL, *Fieldbus Data Link*). A camada 1 usa a norma de transmissão RS-485 para interligação com o meio físico de transmissão. As principais características especificadas pela camada 1 são:

- Transmissão série assíncrona *half-duplex*, baseada na norma RS-485 em par entrançado (*twisted pair*),
- Comprimento máximo do barramento – 1200m, extensível a 4800m dependendo do débito de transmissão,
- Débito: 9,6kbit/s – 500kbit/s,
- Número máximo de estações ligadas ao barramento – 127 (activas e passivas),
- Codificação binária – NRZ.

Os dispositivos ligados ao barramento podem ser mestres (*masters*) ou escravos (*slaves*). O acesso ao meio é realizado através de dois métodos, comunicação mestre/escravo e anel lógico de passagem de *token* (*token passing*) entre os mestres. Toda comunicação é inicializada por um mestre; os escravos apenas respondem a requisições dos mestres – são elementos passivos. Este mecanismo é ilustrado na Figura 3-9.
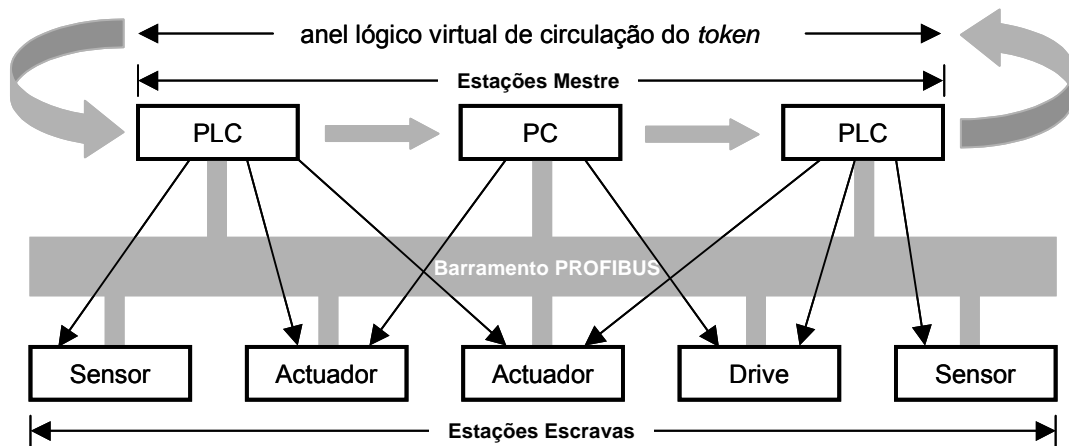
Figura 3-9: Método de passagem do *token* e comunicação Mestre/Escravo num barramento PROFIBUS.

A comunicação entre estações mestres e suas estações escravas associadas é efectuada do seguinte modo: a estação mestre que detém a posse do *token* (durante um certo intervalo de tempo) tem o direito de comunicar com as suas estações escravas (i.e. sensores, actuadores, etc) assim como passar o *token* para a estação mestre seguinte.

Este método permite também a inserção ou remoção de novas estações mestres e escravas, a detecção de estações desligadas ou em falha e a detecção de erros de transmissão, endereçamento e de passagem do *token* (e.g. *tokens* múltiplos, *tokens* perdidos).

O PROFIBUS suporta quatro tipo de serviços de transmissão de dados, ao nível da camada FDL:

- Send Data with no Acknowledge (SDN),
- Send Data with Acknowledge (SDA),
- Request Data with Reply (RDR),
- Send and Request Data (SRD).

O serviço SDN é usado, pelas estações mestres, para efectuar *broadcasts* não confirmados destinados a todas as outras estações do barramento. Os restantes serviços são baseados na relação existente entre o emissor (estação mestre na posse do *token*) e o receptor (estação escrava ou estação mestre não detentora do *token*). Uma característica destes últimos serviços é que são imediatamente respondidos (*reply*) ou confirmados (*acknowledge*). Esta característica (*immediate-response*) é particularmente importante para o suporte de aplicações de tempo real.

Um conceito importante no protocolo PROFIBUS é o ciclo de mensagem. Um ciclo de mensagem consiste no tempo de duração de uma trama iniciada por uma estação mestre (*request* ou *send/request*) e a trama de resposta ou confirmação associada (*acknowledge* ou *reply*). As tramas de resposta ou confirmação devem chegar dentro de um tempo pré-estabelecido – *slot time*, caso contrário o emissor repete o pedido. O número de tentativas, antes de ser reportado um erro, é definido em todas as estações mestre, na fase de inicialização da rede.

Uma das funções principais do método de acesso ao meio (MAC) é o controlo do chamado "*token cycle time*". Após a recepção do *token*, é iniciada a medição do tempo da sua rotação que termina com a recepção do *token* seguinte. Este valor é definido por T_{RR} (*Token Rotation Time*). O valor T_{TR} (*Target Token Rotation Time*) é um parâmetro atribuído, comum a todas as estações mestres, que define a capacidade de resposta da rede. Quanto mais baixo for T_{TR} menos tempo as estações mestre estão na posse do *token*. Quando uma estação mestre recebe o *token*, é calculado o valor T_{TH} (*Token Holding Time*), dado por:

$$T_{TH} = T_{TR} - T_{RR}$$

Existem duas categorias de mensagens: alta prioridade e baixa prioridade. Estes dois tipos de mensagens usam duas filas de espera de saída independentes. Se o *token* está atrasado, isto é, T_{RR} é maior que T_{TR}, uma estação mestre pode executar, no máximo, um ciclo de mensagem de alta prioridade. Caso contrário, a estação mestre pode executar ciclos de mensagem de alta prioridade, enquanto $T_{TH} > 0$. O valor de T_{TH} é sempre testado no início da execução de cada ciclo de mensagem. Os ciclos de mensagem de baixa prioridade são executados se não houver mensagens de alta prioridade pendentes e enquanto $T_{TH} > 0$. A Figura 3-10 ilustra este mecanismo.

Além da diferenciação entre mensagens de alta prioridade e baixa prioridade, são definidos três subtipos de ciclos de mensagens de baixa prioridade:

- **poll-list**

Destinadas a efectuarem o varrimento (*polling*), dos sensores e / ou actuadores, baseados numa lista (*poll-list*), mantida ao nível da camada FDL e percorrida de forma sequencial.

- **non-cyclic low priority**

São usadas pela camada de aplicação e por serviços de gestão remotos.

- **gap-list**

Destinadas ao suporte dinâmico de alterações no anel lógico (i.e. inserção ou remoção de estações). A *gap-list* contém todos os endereços possíveis entre uma dada estação e a seguinte.
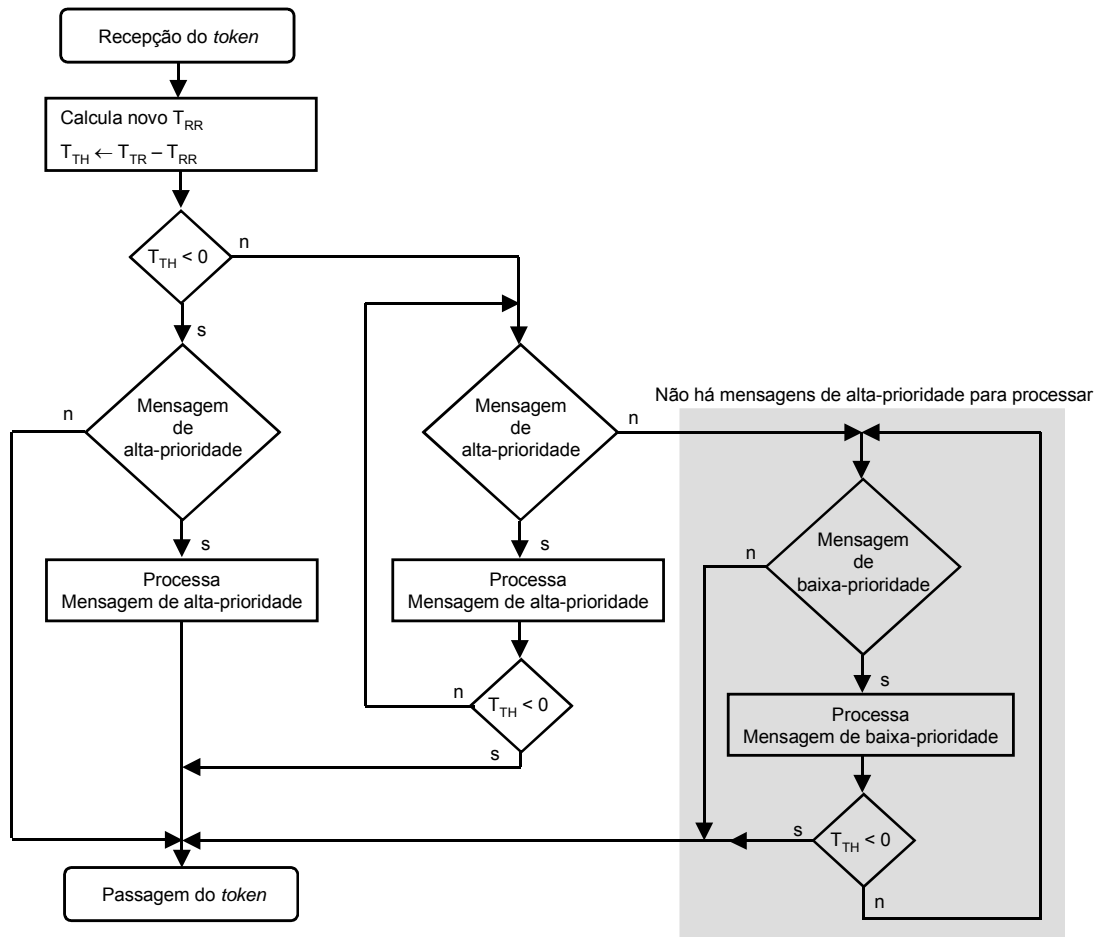
Figura 3-10: Processamento de mensagens de alta e baixa prioridade.

Após terem sido enviadas todas as mensagens de alta prioridade, iniciam-se os ciclos de mensagens *poll-list*. Se estes forem completados durante T_{TH}, as mensagens do tipo *non-cyclic low priority* são enviadas. Se um *poll cycle* tiver uma duração correspondente a várias "visitas" do *token* a *poll list* é processada em segmentos, sem o envio de mensagens *non-cyclic low priority*. Estas só são enviadas após ser completado um *poll cycle*. Se não houver mais mensagens pendentes e existir ainda tempo disponível (T_{TH}), é verificado se um dos endereços da *gap-list* foi activado. Nesse caso, a lista é actualizada e o *token* é enviado agora para a nova estação inserida ou activada.

3.2.3 Process Network (P-NET)

A P-NET (P-NET, *Process Network*) foi projectada no início dos anos oitenta com o intuito de interligar PLCs e sensores / actuadores inteligentes a PCs de controlo num único barramento. A rede então criada permitiu economizar custos relacionados com um projecto simples, de fácil instalação, cablagem reduzida assim como baixos custos de operação e manutenção. Ao mesmo tempo, esta rede possibilita a obtenção de diagnósticos em tempo real e a expansão futura, mantendo a configuração já instalada. A P-NET transformou-se numa norma em 1989 [DS90] e é suportada mundialmente em diversos produtos comerciais.

A rede P-NET é suportada, ao nível físico, por um par entrançado blindado, baseada na norma de transmissão série RS-485. O comprimento máximo do cabo é de 1200m sem uso de repetidores. A transmissão de informação é assíncrona usando o código de linha NRZ. Esta rede consegue suportar até 300 transacções confirmadas por segundo de 300 endereços independentes.

A informação transmitida pode ser resultante quer de valores associados a variáveis de processo (i.e. temperatura, pressão, etc) ou blocos de 32 valores binários independentes relacionados com informação de estado (e.g. *start / stops*).

A rede P-NET utiliza um método de acesso ao meio (MAC) semelhante ao descrito na norma PROFIBUS. A estação mestre, na posse do *token*, envia pedidos à sua estação escrava que retorna uma resposta imediata. Quando a estação mestre termina o acesso ao meio, envia o *token* para a estação mestre seguinte. A passagem do *token* entre estações mestres é cíclica e limitada temporalmente.

A P-NET não permite a existência de categorias ou classes de serviço diferenciadas. Todos os dispositivos são semelhantes nas suas interfaces de comunicação o que minimiza os tempos de projecto e configuração. O tempo de configuração de cada nó é também substancialmente reduzido uma vez que apenas é efectuado, em cada estação mestre, a configuração do endereço e um conjunto de configurações adicionais igual ao número de estações mestre.

3.2.4 Factory Instrumentation Protocol (FIP)

O protocolo FIP (FIP, *Factory Instrumentation Protocol*) foi desenvolvido por um grupo de utilizadores, fabricantes e investigadores franceses com o intuito de interligar sensores e / ou

actuadores. No fim da década de oitenta tornou-se uma norma francesa [NF89] que especifica as camadas Física, Ligação de dados e Aplicação do Modelo OSI.

Permite a interligação desde simples sensores e actuadores a sensores e / ou actuadores inteligentes, podendo ser usada ainda para a interligação de controladores de baixo nível. Do ponto de vista hierárquico, esta norma possui as características típicas de um Barramento de Campo.

A camada Física deste protocolo permite o suporte de transmissão sobre par entrançado blindado assim como cabos de fibra óptica. O número de nós por controlador sem uso de repetidores é de 60, com um comprimento máximo de cabo de 1km e com um débito máximo de 2,5Mbit/s. O modo de transmissão é síncrono, em que é usado o código de linha *Manchester*. O método de acesso ao meio (MAC) é centralizado.

A camada de Ligação de dados especifica os serviços de transmissão. São atribuídos identificadores múltiplos assim como filas de espera a mensagens com requisitos temporais diferentes: periódicas e a pedido. As mensagens a pedido a serem enviadas ou recebidas são colocadas em filas de espera nas camadas de Ligação de dados dos nós de emissão e de recepção. As mensagens em fila de espera são então escalonadas, como as mensagens periódicas, e emitidas através da rede.

A camada de Aplicação fornece serviços locais e remotos de leitura e escrita para lidar com mensagens periódicas e a pedido, respectivamente. Estes serviços são agrupados nas seguintes classes:

- sensor,
- actuador,
- concentrador I/O,
- controlador da linguagem programação,
- operador,
- consolas de programação.

As características principais do protocolo FIP são a garantia dos tempos de resposta e quantidade de mensagens transmitidas.

3.3 O Modo de Transferência Assíncrono ATM

O Modo de Transferência Assíncrono - ATM é um conceito definido pelo ITU-T[1] (ITU-T, *International Telecommunications Union – Telecommunication Standardization Sector*) referido como a tecnologia capaz de dotar a Rede Digital com Integração de Serviços de Banda Larga (RDIS-BL) com os requisitos necessários ao transporte integrado de todo o tipo de serviços. Através do uso do ATM, serviços como a voz, vídeo e dados podem ser transmitidos, multiplexados e comutados, juntamente, num único formato universal. A rede resultante é por isso mais simples, fácil de gerir e de administrar e usa os seus recursos de uma forma eficiente.

As primeiras recomendações sobre ATM foram publicadas em 1993 pelo ITU-T, ATM Forum e ANSI (ANSI, *American National Standards Institute*). Estas, para além de referirem os aspectos gerais do ATM, definem as características funcionais da rede ATM, o modelo de referência de protocolos, as características funcionais das diferentes camadas, as especificações da interface utilizador-rede e princípios de operação e manutenção.

Segue-se uma apresentação das principais características do ATM de acordo com o ITU-T e com o ATM Forum.

Comutação Rápida de Pacotes - ATM

Comutação Rápida de Pacotes[2] é um conceito que cobre diversas alternativas, todas elas com uma característica básica comum - comutação de pacotes com reduzidas funções de rede. Foram usados diferentes nomes nas diversas soluções alternativas propostas por várias organizações. Os nomes mais vulgares são: ATM (ATM, *Asynchronous Transfer Mode*) que é a designação oficialmente usada pelo ITU-T, ATD (ATD, *Asynchronous Time Division*) o nome originalmente usado pelo CNET (CNET, *Centre National d'Etudes des Telecommunications*) e mais tarde adoptado na Europa [Cou83], e, finalmente, FPS (FPS, *Fast Packet Switching*), a técnica mais aprofundada nos Estados Unidos [Tur83].

---

1 ITU-T antigo CCITT - Comité Consultative International de Teléphone et Telégraphe.

[2] Comutação Rápida de Pacotes – (em inglês – *Fast Packet Switching*) – Técnica adoptada pelo ITU-T como suporte da RDIS de Banda Larga e posteriormente designada por Modo de Transferência Assíncrono – ATM.

O nome FPS era já aplicado anteriormente aos sistemas a operarem a taxas maiores que os sistemas de comutação de pacotes tradicionais, graças às suas reduzidas funcionalidades. Quer na sigla ATD, quer na ATM, a palavra *Asynchronous* tem sido usada pois esta técnica além de permitir uma operação assíncrona entre o relógio de emissão e o relógio de recepção, não impõe uma relação temporal pré-definida entre os tempos de transmissão de unidades consecutivas (pacotes, tramas, células, etc.). A diferença entre os dois relógios pode ser facilmente resolvida através da inserção / remoção de pacotes vazios na trama de informação, isto é, pacotes que não contêm informação útil.

Todas estas alternativas têm uma característica comum que garante o seu sucesso, ou seja, a possibilidade de transportar qualquer serviço independentemente das suas características, tais como débito, requisitos de qualidade ou a natureza *bursty*. Esta última vantagem foi uma das motivações mais fortes para o ITU-T adoptar o ATM como o modo de transferência para a RDIS de Banda Larga.

Uma rede baseada num modo de transferência independente do serviço não terá as desvantagens dos outros modos de transferência descritos anteriormente: dependência do serviço, incapacidade de adaptação a novos serviços, ineficiência no uso dos recursos disponíveis, fraca adaptação a fontes do tipo *bursty*, etc. Deste modo, podem enumerar-se as principais vantagens do ATM:

- **Flexibilidade e capacidade de evolução:**

Os avanços no estado da arte dos algoritmos de codificação e da tecnologia VLSI tendem a reduzir os requisitos de largura de banda dos serviços existentes. Novos serviços poderão surgir com características ainda desconhecidas. Todas estas transformações poderão vir a ser suportadas com sucesso, sem nenhuma alteração e sem perda de eficiência na rede ATM. Os sistemas ATM (transmissão, comutação e multiplexagem) não necessitam de ser modificados.

- **Uso eficiente dos recursos:**

Todos os recursos disponíveis na rede podem ser usados por todos os serviços, o que possibilita uma óptima distribuição estatística de recursos. Não existe especialização de recursos na rede ATM, o que significa que qualquer recurso disponível pode ser usado por qualquer serviço.

- **Rede Universal de serviços:**

Uma vez que só uma rede necessita de ser projectada, controlada, implementada e mantida, os custos globais do sistema deverão ser reduzidos devido a economias de escala. Estas vantagens beneficiarão todos os membros envolvidos no mundo das telecomunicações: clientes, operadores e fabricantes.

3.3.1 Princípios básicos do ATM

À semelhança do modelo OSI da ISO, o modelo de referência de protocolos (PRM, *Protocol Reference Model*) descrito na Rec. I.321 do ITU-T [ITU91b], satisfaz os princípios da modularidade e independência da tecnologia, definindo os serviços e os protocolos por camadas e as respectivas primitivas de serviço. O modelo de referência de protocolos da RDIS-BL está esquematizado na Figura 3-11:
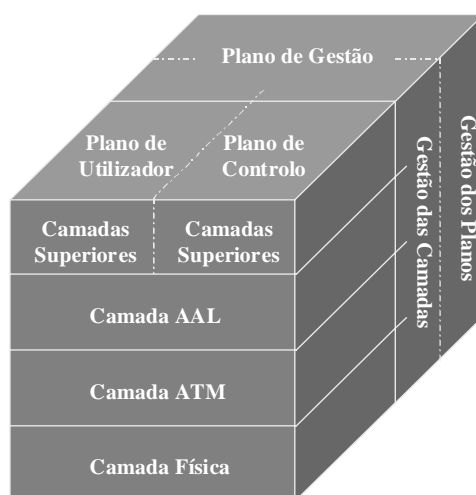
Figura 3-11: Modelo de Referência de Protocolos.

Tal como no PRM da RDIS, existem três planos: o plano de utilizador, onde é efectuado o transporte da informação a ele associado, o plano de controlo, que lida principalmente com informação de sinalização, e o plano de gestão, usado para fazer a coordenação entre os planos e executar funções operacionais.

De acordo com o ITU-T, as camadas podem ser divididas tal como se apresenta na Tabela 3-5. As funções das camadas superiores do PRM são dependentes dos serviços e a camada de adaptação AAL (AAL, *ATM Adaptation Layer*) executa funções dependentes dos serviços suportados pelas camadas superiores.

Tabela 3-5: Funções e subcamadas do PRM.

Camadas Superiores		
Convergência	CS	AAL
Segmentação e Reunião	SAR	
Controlo Global de Fluxo Geração e Extracção do Cabeçalho da Célula Comutação Multiplexagem e Desmultiplexagem de Células		ATM
Desacoplamento do débito de célula Verificação / Criação da sequência do HEC do Cabeçalho Delineação de Células Adaptação para a transmissão de tramas Inserção e extracção de células em tramas	TC	PL
Extracção do Relógio de bit Meio Físico	PM	

A camada ATM é independente dos serviços e da camada Física associada ao meio de transmissão.

Na camada AAL, as funções dependentes dos serviços constituem a subcamada de convergência (CS, *Convergence Sublayer*) e as funções de adaptação à camada ATM formam a subcamada de Segmentação e Reunião (SAR, *Segmentation and Reassembly Sublayer*).

Na camada Física PL (PL, *Physical Layer*), as funções dependentes do meio físico constituem a subcamada de Meio Físico (PM, *Physical Medium*) e as funções de adaptação à camada ATM formam a subcamada de Convergência para a Transmissão (TC, *Transmission Convergence*).

3.3.1.1 Categorias de Serviços, ATCs e Classes de Serviço

Os procedimentos de estabelecimento de uma ligação e a implementação de mecanismos de controlo de tráfego requerem uma grande flexibilidade na camada de gestão da rede [Lue98]. Para lidar com a diversidade de parâmetros de tráfego e de desempenho, o ITU-T Study Group 13 definiu dois conceitos distintos:

- ATC (ATC, *ATM Transfer Capability*) [ITU97a],
- Classes de Serviço [ITU96f].

Uma ATC descreve os parâmetros da camada ATM a serem especificados e os procedimentos aplicáveis. As Classes de Serviço especificam quais os aspectos funcionais relacionados com a adaptação dos serviços à rede (e.g. fragmentação, adaptação de relógios, multiplexagem).

Para se cumprir um determinado contrato de tráfego, o utilizador selecciona uma dada ATC e os valores dos parâmetros relevantes (o descritor de tráfego de fonte e tolerâncias associadas) e selecciona uma Classe de Serviço. Com a especificação do contrato de tráfego, a rede e o utilizador sabem o que esperar. A rede garante as características da ligação, enquanto que a fonte terá de operar de acordo com as condições do contrato de tráfego estabelecido.

Uma ATC descreve as características gerais de uma ligação. Por exemplo, se a capacidade de transmissão está permanentemente disponível e que acções devem ser tomadas no caso de a taxa de envio de células ser excedida pela fonte. O ITU-T SG 13 especifica sete ATCs cujas características principais são descritas a seguir:

- **DBR (DBR, *Deterministic Bit Rate*)**

Caracteriza-se por garantir um valor de pico (PCR, *Peak Cell Rate*) disponível continuamente, transferido com uma QoS especificada. As aplicações que geram tráfego de débito constante devem optar por este tipo de ATC. As aplicações que geram tráfego de débito variável poderão também optar igualmente por esta ATC.

- **SBR (SBR, *Statistical Bit Rate*)**

SBR1, SBR2 e SBR3 formam uma família de ATCs similares. Todas elas garantem uma taxa de células “sustentada” (SCR, *Sustainable Cell Rate*), uma espécie de taxa média de longo prazo. Adicionalmente, permitem a ocorrência de *bursts* (de tamanho negociável) a uma taxa mais elevada com limite máximo imposto pelo PCR, respeitando o SCR. As aplicações que geram tráfego de débito variável e que produzem *bursts* limitados encontram nesta ATC um mecanismo de transferência de informação adequado.

O SBR1 verifica se os parâmetros estão de acordo com os valores pré-estabelecidos.

O SBR2 e SBR3 baseiam-se na indicação dada pelo CLP em cada célula. O SCR é verificado apenas em células com CLP = 0 (células com menor prioridade em serem descartadas). O PCR é verificado em todas as células. A distinção entre o SBR2 e o SBR3 é feita no modo como tratam as células com o CLP = 0 que excedem o valor do SCR. O SBR2 considera tais células excedentes ao contrato (e poderá descartá-las). O SBR3 altera o valor do CLP das células excedentárias para CLP = 1, mantendo-as na rede, se cumprirem o limite imposto pelo PCR.

- **ABR (ABR, *Available Bit Rate*)**

Esta ATC garante uma taxa mínima de transferência de células (MCR, *Minimum Cell Rate*). O valor do MCR, seleccionado pelo utilizador, pode virtualmente ser zero. Dependendo do instante, a rede pode disponibilizar mais capacidade de transmissão de uma forma dinâmica. Através de células de gestão de recursos (*resource management cells*), os utilizadores “interrogam” regularmente a rede acerca da capacidade disponível e são informados no sentido de baixar ou subir o débito de transmissão. Esta ATC é adequada para o suporte de aplicações que têm a propriedade de adaptar o débito de informação (acima do MCR) à capacidade oferecida pela rede.

- **ABT (ABT, *ATM Block Transfer*)**

As duas variantes desta ATC, ABT-DT (*Delayed Transfer*), e ABT-IT (*Immediate Transfer*), permitem também a alteração das taxas de transmissão em função da flutuação da capacidade oferecida pela rede. No caso do ABT, a taxa permitida pela rede é acordada inicialmente e garantida durante a transferência do bloco de células. O tamanho do bloco de células é um dos parâmetros especificado no início da transferência. No caso da variante ABT-DT a fonte aguarda confirmação da rede antes de transmitir o bloco de células, enquanto que na variante ABT-IT a fonte transmite o bloco de células imediatamente, o que pode provocar atrasos ou perdas se o pedido não for garantido. Esta última é adequada para fontes que adaptem o seu ritmo de transmissão em instantes determinados pela fonte e não pela rede.

O ITU-T SG 13 elaborou estas ATCs nas recomendações [ITU96e] [ITU97a]. Os requisitos de novas aplicações e as novas formas de utilização da rede poderão vir a necessitar da definição de novas ATCs, tais como CT (CT, *Controlled Transfer*) ou UBR (UBR, *Unspecified Bit Rate*). Embora este aumento de ATCs introduza a desvantagem da selecção ser feita através da escolha entre um maior número de ATCs, é desejável pois poderá permitir o suporte de novos serviços, ou o suporte de um serviço de uma forma mais eficiente, quer para a rede quer para a aplicação. O objectivo será definir ATCs em número suficiente de forma a poder suportar todas as necessidades de transporte actuais e futuras.

Na Tabela 3-6 está especificada a classificação das diferentes Classes de Serviços. Os parâmetros através dos quais é feito o agrupamento são:

- **Relação temporal entre fonte e destino:**

Vários serviços requerem que seja preservada a relação temporal entre a fonte e o destino. Por exemplo, nos canais B da RDIS a 64kbit/s, existe uma relação temporal bem definida entre fonte e destino. A transferência de pacotes de dados não requer esta relação.

- **Débito:**

Serviços tais como o transporte de canais telefónicos geram informação a um débito fixo, enquanto que certos tipo de codificadores geram informação a um débito variável, em função das propriedades do sinal (e.g. codificação de vídeo de débito variável).

- **Modo de Operação:**

Um serviço pode ser responsável por estabelecer e remover uma ligação com o destino, enquanto que outros podem operar num modo sem ligação.

Tabela 3-6: Classificação das diferentes Classes de Serviço.

<table>
<tr><th></th><th>Classe A</th><th>Classe B</th><th>Classe C</th><th>Classe D</th></tr>
<tr><td>Relação Temporal entre Fonte e Destino</td><td colspan="2">Existente</td><td colspan="2">Não existente</td></tr>
<tr><td>Débito</td><td>Constante</td><td colspan="3">Variável</td></tr>
<tr><td>Modo de Operação</td><td colspan="3">Com Ligação</td><td>Sem Ligação</td></tr>
</table>

O ATM Forum define Categorias de Serviços em vez de ATCs ou Classes de Serviço. Enquanto que as Categorias de Serviços estão associadas à camada ATM, as Classes de Serviço estão relacionadas com a escolha do tipo de protocolo AAL. No entanto, existe correspondência entre as características de tráfego de Categorias de Serviço e ATCs. A Tabela 3-7 mostra a relação existente entre estas duas abordagens.

Tabela 3-7: Categorias de Serviço e ATCs.

ATM Forum	ITU-T SG 13
CBR	DBR
nrt-VBR	SBR
rt-VBR	SBR
UBR	Não especificado
Sem equivalência	ABT
ABR	ABR

As Categorias de Serviço do ATM Forum [ATM99b] especificam características de tráfego e requisitos de QoS relacionados com o comportamento da rede, da mesma forma que as ATCs e Classes de Serviço do ITU-T SG13. No entanto, as Categorias de Serviço são caracterizadas

em tráfego de tempo-real (CBR e rt-VBR) e sem tempo-real (nrt-VBR, UBR e ABR). No ITU-T a característica de tempo-real está incluída na Classe de Serviço e não na especificação da ATC.

As Categorias de Serviço do ATM Forum permitem o uso das Classes de Serviço do ITU-T [ITU96f], embora favoreçam a negociação de vários parâmetros chave de QoS tais como o valor pico-a-pico do CDV (CDV, *Cell Delay Variation*), o valor máximo do CTD (CTD, *Cell Transfer Delay*), o CLR (CLR, *Cell Loss Ratio*) entre outros, definidos durante o estabelecimento de chamada.

Embora a negociação de parâmetros de QoS permita uma maior flexibilidade ao utilizador e à rede, provoca um aumento substancial na complexidade dos procedimentos de estabelecimento de chamada.

3.3.1.2 A Camada ATM

Em ATM a estrutura básica das redes temporais síncronas é mantida, sendo transportado um bloco de informação de dimensão fixa em cada intervalo de tempo - *slot*. A este bloco de informação chama-se célula. As células são transportadas na rede com base numa etiqueta (*label multiplexing*) não ocupando por isso uma posição fixa no tempo como acontece no modo de comutação de circuitos.

A dimensão de cada célula é de 53 octetos e, como mostra Figura 3-12, decompõe-se em dois campos: cabeçalho e informação. O cabeçalho, com 5 octetos, contém, entre outros parâmetros, os que permitem fazer o encaminhamento da célula através da rede. O outro campo é destinado a transportar a informação do utilizador (*payload*).
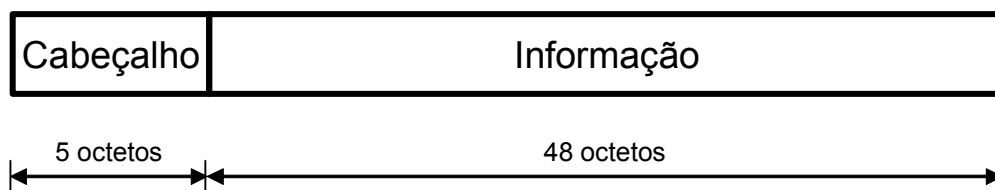
Figura 3-12: Formato de uma célula ATM.

As características da camada ATM são independentes do sistema de transmissão e do meio de transmissão utilizados. A adaptação da camada ATM ao sistema de transmissão é feita ao nível da camada Física. Esta separação, entre a camada ATM e a transmissão, permite que comutadores e multiplexers ATM, possam ser introduzidos na rede e evoluir independentemente dos aspectos de transmissão da rede.

Ao nível da camada ATM só o cabeçalho é processado, uma vez que o campo de informação só é processado nos extremos de uma ligação. Os 5 octetos do cabeçalho são repartidos por diversos campos, conforme mostra a Figura 3-13:
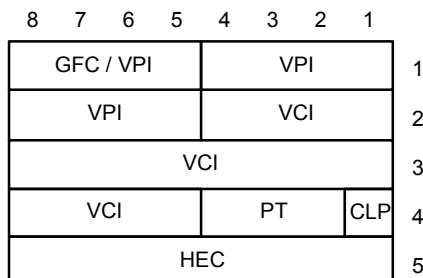
Figura 3-13: Estrutura do cabeçalho da célula ATM nas interfaces de utilizador (UNI) e de rede (NNI).

A estrutura do cabeçalho é diferente na interface utilizador-rede (UNI, *User Network Interface*) e nas interfaces internas da rede, designadas interfaces entre nós da rede (NNI, *Network Node Interface*).

A diferença consiste somente na existência do campo para controlo de fluxo (GFC, *Generic Flow Control*), que é utilizado na interface UNI, no caso de existirem configurações com múltiplos utilizadores, para controlar o acesso destes à rede. Como o campo GFC é desnecessário nas interfaces internas da rede, é aproveitado nas interfaces entre os nós para aumentar o comprimento do campo VPI.

A identificação de um canal lógico ATM está dividida em duas entidades hierárquicas: caminho virtual (VP, *Virtual Path*) e canal virtual (VC, *Virtual Channel*). Estas entidades são identificadas no cabeçalho da célula pelo identificador de caminho virtual (VPI, *Virtual Path Identifier*) e pelo indentificador de canal virtual (VCI, *Virtual Channel Identifier*). Assim, num dado Caminho Virtual será possível transportar 65 536 (2^{16}) Canais Virtuais. Numa dada interface, um canal de comunicação é identificado pelo campo (VPI+VCI) completo. A relação hierárquica entre caminhos e canais virtuais está ilustrada na Figura 3-14.
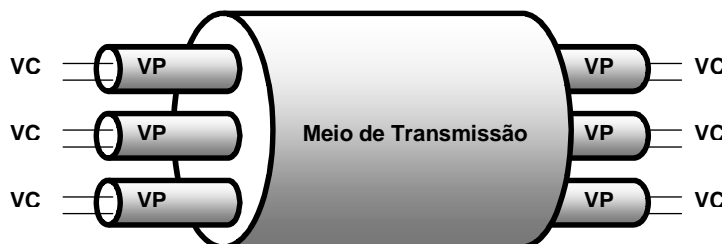
Figura 3-14: Relação entre Canais Virtuais e Caminhos Virtuais.

A existência de caminhos virtuais permite que a rede suporte ligações semi-permanentes entre utilizadores, comutando caminhos virtuais, tratando de um modo global todos os canais virtuais pertencentes a um caminho virtual. Por outro lado, as ligações na rede são estabelecidas através de comutadores ATM, que comutarão caminhos e canais virtuais individualmente A Figura 3-15 ilustra o mecanismo de comutação de canais e caminhos virtuais.
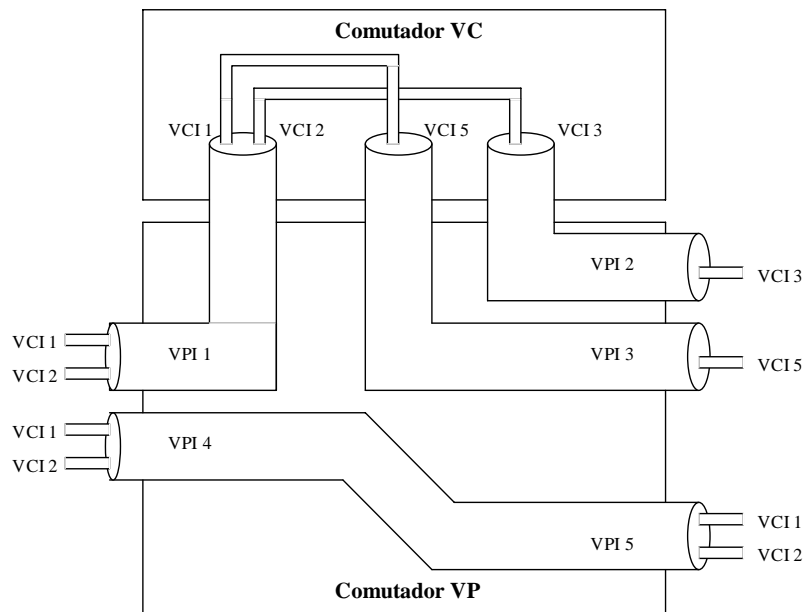
Figura 3-15: Comutação de Caminhos Virtuais (VP) e Canais Virtuais (VC).

O bit CLP (CLP, *Cell Loss Priority*) indica a prioridade de perda de célula e é manipulado quer pelo nó de origem da célula, quer por um nó intermédio de comutação. Permite atribuir dois níveis de QoS associados à célula - normal (CLP=0) e baixa prioridade (CLP=1). No caso de congestionamento da rede nos nós de comutação, as células de prioridade mais baixa serão as primeiras a ser eliminadas. Este mecanismo foi inicialmente proposto como solução parcial para efectuar o controlo de fluxo – numa dada ligação as células que violassem uma dada função de policiamento, teriam o bit CLP=1, tornando-as descartáveis se num dos nós de comutação seguintes existisse congestionamento provocado pelo restante tráfego.

Os três bits PT (PT, *Payload Type*) veiculam informação entre entidades existentes ao nível da camada ATM e indicam o tipo de informação contida na célula. A célula pode conter informação do utilizador, informação para gestão e manutenção da rede, ou pode veicular informação acerca do congestionamento da rede observado pela célula. Outra função importante implementada por este campo é o AAU (AAU, *ATM User to User Indication*) usada pela camada AAL-5 para indicar a última célula de um pacote da camada de utilizador.

O campo HEC (HEC, *Header Error Control*) é um campo para controlo de erros no cabeçalho. Devido ao mecanismo de controlo de erros ser também usado para determinar a delimitação de células, remete-se a sua descrição para a secção 3.3.1.4.

3.3.1.3 A Camada de Adaptação

A camada ATM fornece um serviço que é independente da estrutura da unidade de informação e do débito dos serviços suportados. É na camada AAL que as características particulares de cada serviço são adaptadas no sentido de satisfazer a QoS requerida.

Embora as funções que a camada AAL efectua estão dependentes do serviço específico a transportar, podemos destacar as seguintes:

- mapeamento dos formatos de informação da camada acima da AAL nos campos de informação das células ATM,
- recuperação da frequência do relógio e compensação da variação do atraso das células correspondente ao serviço suportado, quando requerido pelas características do serviço,
- detecção da ocorrência de células perdidas e o desencadear das medidas necessárias para diminuir o impacto desta situação na QoS,
- detecção da ocorrência de células mal inseridas e sua correspondente eliminação.

Para cada tipo de AAL as funções básicas são efectuadas numa subcamada de AAL, chamada de subcamada de Segmentação e Reunião (SAR, *Segmenting And Reassembly sublayer*). A subcamada acima desta na AAL é chamada subcamada de Convergência (CS, *Convergence Sublayer*) e implementa funções requeridas para um serviço específico dessa classe [ITU93c]. Actualmente os serviços podem recorrer a quatro especificações tipo, da camada AAL:

- AAL-1: Suporta serviços CBR, sendo as principais aplicações a emulação de circuitos e o transporte de aplicações de áudio e vídeo de alta qualidade [ITU96b],
- AAL-2: Suporta tráfego VBR (VBR, *Variable Bit Rate*), permitindo reduzir o atraso no preenchimento das células assim como optimizar a eficiência na utilização da largura de banda [ITU97b],
- AAL-3/4: Suporta serviços de dados orientados à ligação e sem ligação, em 2 modos de transferência de informação: o modo mensagem e o modo fluxo [ITU96c].

- AAL-5: Fornece funções semelhantes ao AAL-3/4 mas com uma eficiência superior, satisfazendo os requisitos de eficiência e simplicidade na transferência de informação de dados e sinalização, devido a ter menos campos de controlo no cabeçalho das células [ITU96d].

Os parágrafos seguintes descrevem, com algum detalhe, os vários tipos de AALs já normalizados.

AAL - Tipo 1

Sendo a futura RDIS de Banda Larga uma rede capaz de suportar qualquer tipo de serviço, assim como interligar as redes existentes e futuras, e constituindo a "espinha dorsal" da infra-estrutura de telecomunicações, será também capaz de suportar o transporte do tráfego de débito binário constante - CBR (CBR, *Constant Bit Rate*), característico das redes de comutação de circuitos.

Tal como a rede de comutação de circuitos é mais vocacionada para o transporte de sinais de débito binário constante, a rede ATM (por utilizar uma tecnologia de comutação de pacotes) é mais adequada ao transporte de sinais do tipo *burst*, tais como dados.

O transporte de sinais CBR, numa rede ATM, é vulgarmente referido como Emulação de Circuitos [Cab95]. O desempenho de um Serviço de Emulação de Circuitos (CES, *Circuit Emulation Service*) em redes ATM deve ser comparável ao verificado com recurso a técnicas TDM (TDM, *Time Division Multiplexing*).

A Figura 3-16 representa o formato da unidade de dados do protocolo (PDU, *Protocol Data Unit*) para a subcamada de segmentação e reunião (SAR-PDU) na camada de adaptação do tipo 1 correspondente a serviços da Classe A.
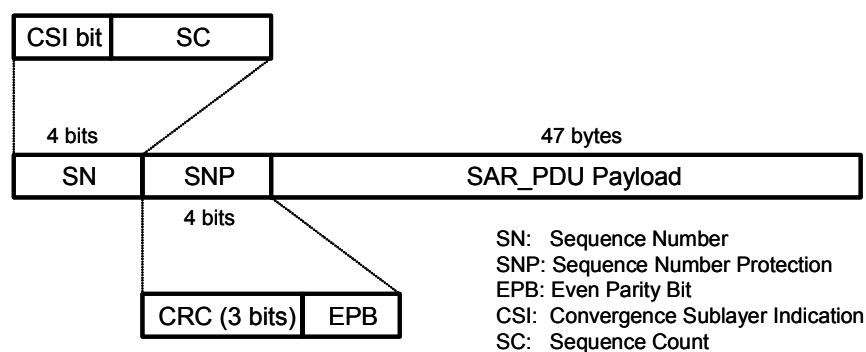
Figura 3-16: Unidade de dados do protocolo para a subcamada SAR do AAL-1.

O primeiro octeto do campo de informação da célula (SN, *Sequence Number*) é composto por um campo utilizado para a inserção de um número de sequência SC (SC, *Sequence Count*) e de um bit CSI (CSI, *Convergence Sublayer Indication*) utilizado para veicular informação da subcamada CS. O campo SN é protegido pelo campo SNP (SNP, *Sequence Number Protection*), baseado no polinómio gerador $G(x) = x^3+x+1$ com um bit extra de paridade (EPB). A existência do campo SC permite detectar, na recepção, se houve células perdidas ou mal inseridas durante a transmissão. Os restantes 47 octetos transportam a informação da subcamada superior CS. É ao nível da subcamada CS que os diversos serviços da Classe A são adaptados. Para alguns serviços específicos a subcamada CS suporta algumas funções especiais tais como:

- correcção de erros ao nível do campo de informação. Este processo pode ser combinado com um método em que os bits são entrelaçados antes de serem colocados nas células,
- recuperação de relógio na recepção baseada na sequência de chegada de células. Esta técnica pode ser efectuada através do seguimento do nível de enchimento do *buffer* de recepção.

AAL - Tipo 2

As redes celulares transmitem a informação de voz comprimida em vez de circuitos PCM de 64kbit/s de modo a economizarem largura de banda. Além disso, o débito é também variável, devido à supressão de silêncios, motivados pela economia de potência das baterias dos dispositivos móveis. Nestas circunstâncias, se fosse usado o AAL-1, o atraso no preenchimento de células aumentaria proporcionalmente com a taxa de compressão.

O protocolo AAL-2 foi desenvolvido para suportar tráfego VBR (Classe B) orientado à ligação e com baixo atraso de propagação. As características deste protocolo foram definidas a partir das necessidades da área da telefonia celular onde se procurava integrar eficientemente serviços do tipo voz e vídeo, comprimidos em tempo real, sendo especificado nas recomendações I.363.2 [ITU97b] e I.366.1 [ITU98], criadas no final da década de 90.

A estrutura do protocolo AAL-2 pode ser dividida em duas subcamadas: a subcamada inferior que fornece os serviços comuns da camada AAL, designada de CPS (CPS, *Common Part Sublayer*) e a subcamada superior - que fornece os chamados serviços de convergência específicos da aplicação, designada de SPCS (SPCS, *Service Specific Convergence Sublayer*), como pode ser observado no modelo de referência de protocolos da Figura 3-17.
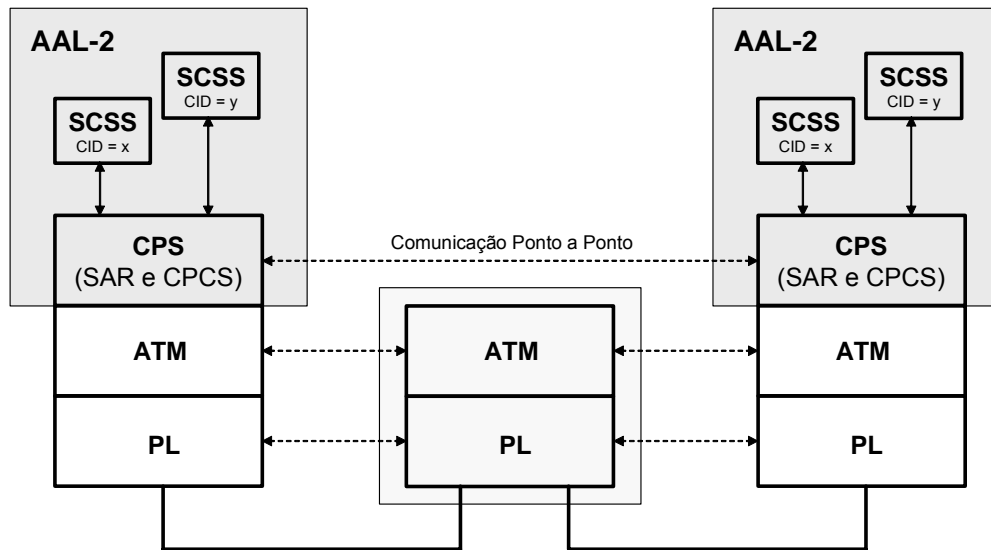
Figura 3-17: Modelo de Referência de Protocolos para o AAL-2.

A recomendação I.363.2 atribuiu à subcamada CPS, do protocolo AAL-2, os serviços de Segmentação e Reunião de células (SAR) e a parte dos serviços comuns de Convergência (CPCS), permitindo a possibilidade de serem definidos outros serviços de convergência específicos (SSCS), de acordo com as necessidades das aplicações. O protocolo AAL-2 proporciona uma ligação ponto-a-ponto entre dois utilizadores e permite, através de seus pontos de acesso (SAP), a capacidade de seleccionar as QoS desejadas para o transporte das unidades de serviço CPS-SDU pela ligação.

Os utilizadores da subcamada CPS são as entidades SSCS ou a camada de gestão, mas a operação é ponto-a-ponto e, apesar das ligações AAL-2 serem multiplexadas e desmultiplexadas, a integridade da sequência dos CPS-SDUs é mantida para cada canal virtual. As múltiplas ligações AAL podem ser associadas a uma única ligação da camada ATM.

Ao receber a primitiva da camada superior, é criado um pacote CPS com a informação recebida e o identificador da entidade que o enviou. O pacote CPS consiste em três octetos no cabeçalho (CPS-PH) seguido de um campo (CPS-PP). O cabeçalho é dividido nas seguintes partes: um octeto para o campo CID, 6 bits para o campo LI, 5 bits para o campo UUI e 5 bits para o campo HEC. A Figura 3-18 ilustra a Unidade de dados do protocolo para a subcamada CPS.

O CID é bidireccional e único para cada ligação individual AAL-2, ou seja, deve ser o mesmo nas duas extremidades. O valor de LI é específico do canal, não necessitando ser comum a todos os canais; cada um pode ter o seu valor fixo, porém, o seu valor máximo por omissão é de 45 octetos (mas pode ser alterado para 64 octetos através de mecanismos de sinalização e

gestão). O campo UUI tem duas funções: transportar informação específica, de forma transparente, através da subcamada CPS e distinguir entre uma entidade SSCS (caso os valores estejam entre 0 e 27) e a camada de gestão.

CID: Channel Identifier (8 bits)
LI: Length Indicator (6 bits)
UUI: User-to-User indication (5 bits)
HEC: Header Error Control (5 bits)
CPS-INFO: Informação (1..45/64 bytes)
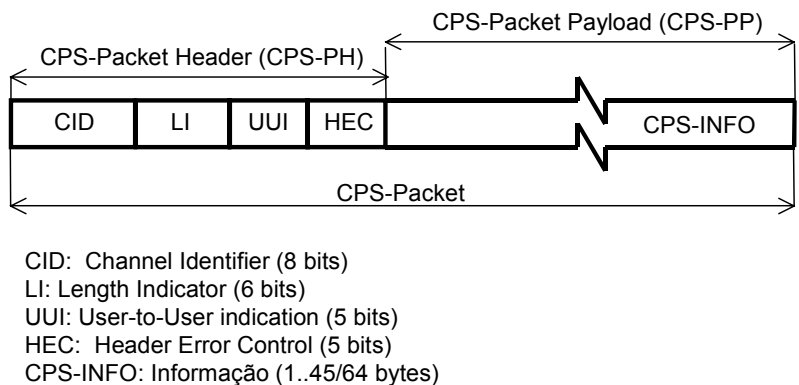
Figura 3-18: Unidade de dados do protocolo para a subcamada CPS do protocolo AAL-2.

É através do campo CID que é possível multiplexar no máximo 248 entidades SSCS numa única ligação ATM. Este campo identifica os pacotes CPS associados a cada um dos fluxos da camada superior. Estes pacotes são agrupados para formar os 48 octetos da ATM-SDU. Devido ao tamanho variável destes pacotes, é necessário localizar a sua posição dentro do campo de informação da célula, através de um pequeno cabeçalho (STF) que ocupa sempre o primeiro octeto. Este mecanismo é ilustrado na Figura 3-19.
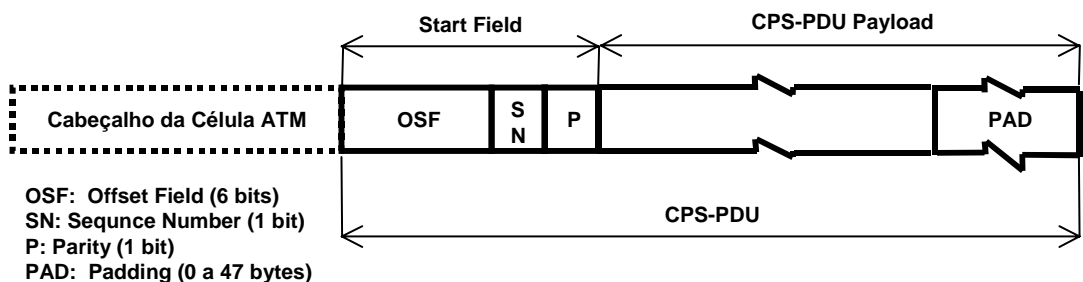
Figura 3-19: Formato do CPS-PDU do AAL-2.

O STF contém um campo de 6 bits de *offset* (OSF), ou seja, localiza o início do próximo pacote CPS ou, na ausência deste, o início do campo PAD. Além disso, o STF contém um bit de paridade (P) e um número de sequência (SN), que juntos formam um mecanismo básico de controlo para detectar perdas de células. Como se pode observar, cada pacote CPS pode ser suportado por uma ou duas células ATM em que o ponto de partição pode ocorrer em qualquer

local do pacote, incluindo o cabeçalho CPS-PH, como se pode observar no exemplo da Figura 3-20 [Amo01].
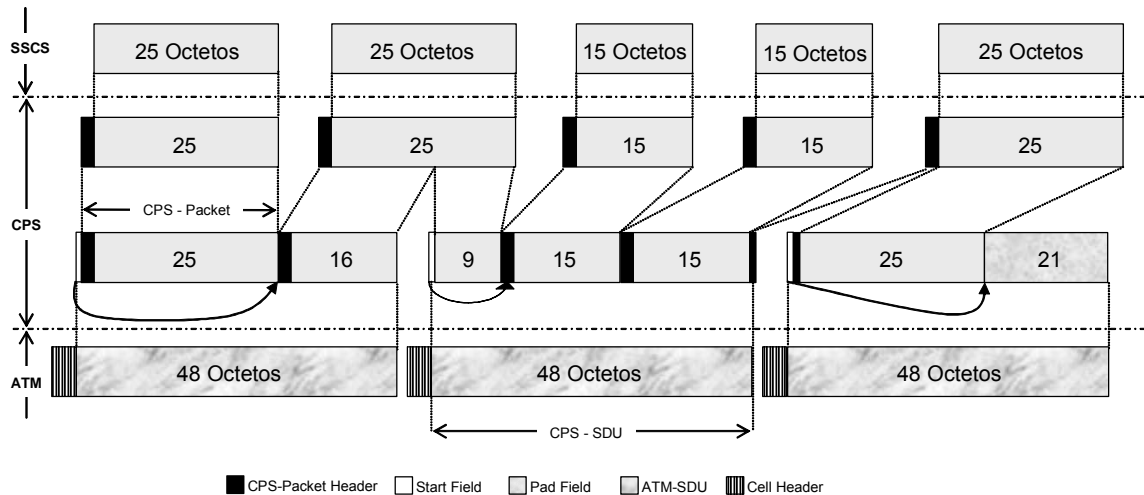
Figura 3-20: Exemplo da multiplexagem de pacotes de comprimento variável na camada AAL-2.

Na Figura 3-20 observa-se o uso de pacotes com tamanhos variáveis (25 e 15 octetos) e como uma única célula pode conter mais do que um pacote. Através da figura fica também claro que um pacote da camada superior, ao ser segmentado, pode prolongar-se por três células, no caso de pacotes de 64 octetos.

Em aplicações de tempo-real o controlo do tempo de atraso e sua variação são essenciais. Este controlo é efectuado através da temporização do tempo de empacotamento, garantido por um relógio denominado *Timer_CU* que gera eventos para a máquina de estados da transmissão. Se a célula é totalmente preenchida, então ela é enviada imediatamente (desde que exista autorização da camada de gestão). Se a célula é parcialmente preenchida, ela aguardará a chegada de mais informação até ser totalmente preenchida, ou que o tempo do relógio expire.

A interacção com o plano de gestão ocorre também através de primitivas para a subcamada CPS. Essas primitivas podem efectuar a comunicação de gestão ponto-a-ponto, ou somente indicar erros na máquina de estados de recepção local. Além disso, o AAL-2 está previsto para transmitir unicamente as células se tiver permissão da camada de gestão, o que ocorre quando recebe a primitiva indicando que o ATC da ligação em vigor admite novas ordens para transmitir. Esta função é implementada através de uma variável de estado que passa ao estado "verdadeiro" quando tem permissão, e após a transmissão de uma célula, retorna ao estado "falso", aguardando nova primitiva de permissão.

A função de multiplexagem agrega vários fluxos de tráfego CPS das camadas superiores numa única ligação ATM. Para esta função, não são especificados na Recomendação I.363.2, o método de gestão das filas de espera dos pacotes na entrada, a disciplina de atendimento ou algum esquema de prioridade.

AAL - Tipo 3/4

O nome como é referido este tipo de AAL reflecte o seu estado de desenvolvimento. Assim, no início foram definidos o AAL-3 e AAL-4 para as classes C e D, respectivamente. Posteriormente, estes dois tipos de AAL foram aglutinados num único (AAL-3/4) suportando ambas as classes C e D [Hän94].

Para tal, a subcamada CS é dividida em duas partes (Figura 3-21):

- CPCS (CPCS, *Common Part Convergence Sublayer*),
- SSCS (SSCS, *Service Specific Convergence Sublayer*).
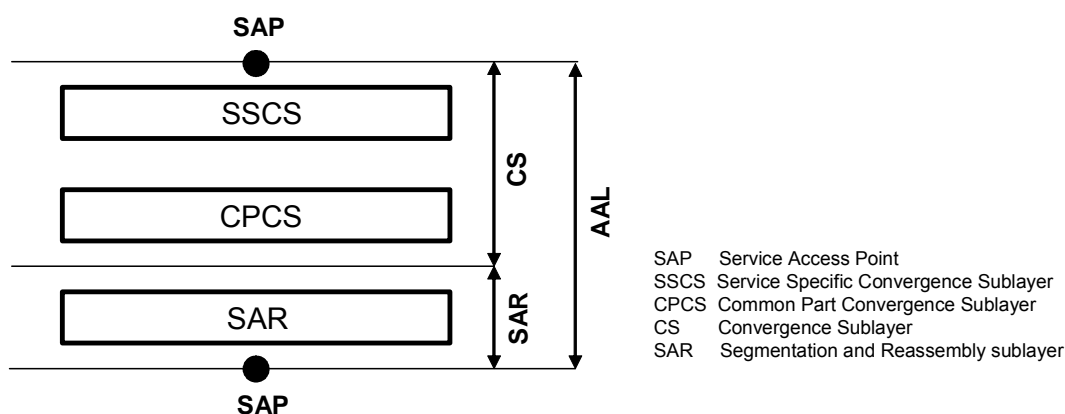
Figura 3-21: Subcamadas do protocolo AAL-3/4.

A subcamada de convergência é subdividida em CPCS e SSCS. As funções implementadas na subcamada SSCS são dependentes da aplicação e podem nem existir.

Este tipo de AAL suporta dois modos de transferência de informação:

- Modo mensagem,
- Modo fluxo.

No modo mensagem uma única unidade de dados do serviço AAL-SDU (AAL-SDU, *AAL - Service Data Unit*) é segmentada em uma ou mais unidades do protocolo da subcamada de

convergência CS-PDU, enquanto que no modo de fluxo uma ou mais unidades de tamanho fixo são transportadas numa única unidade de dados do protocolo CS-PDU. Na Figura 3-22 está ilustrado o modo de mensagem e na Figura 3-23 o modo de fluxo.
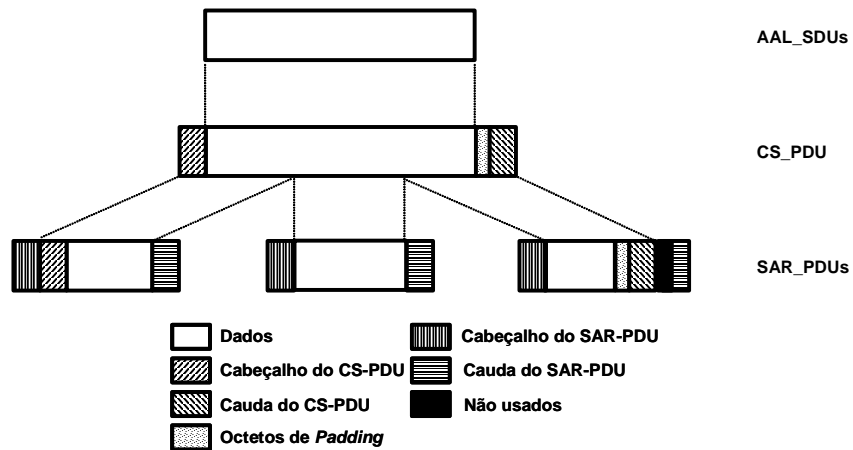
Figura 3-22: Modo de mensagem.

O modo de mensagem é usado no transporte de grandes estruturas de dados, enquanto que o modo de fluxo é adequado à transferência de dados de baixo débito com requisitos de atraso baixos.
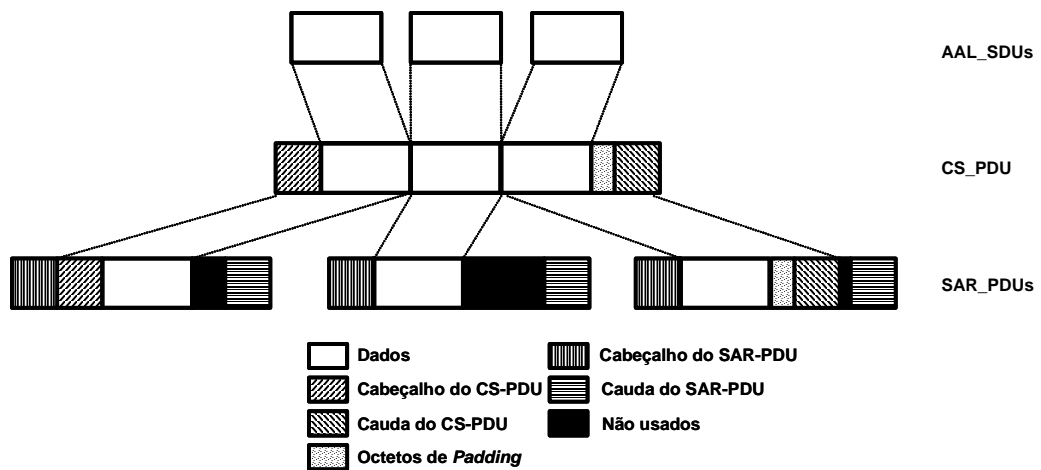
Figura 3-23: Modo de fluxo.

Para adaptação de serviços das classes C e D é utilizado, ao nível da SAR, a unidade de dados do protocolo indicada na Figura 3-24. Os dois primeiros octetos (cabeçalho) do campo de informação contêm os campos ST (ST, *Segment Type*), SN (SN, *Segment Number*) e MID (MID, *Message Identifier*).
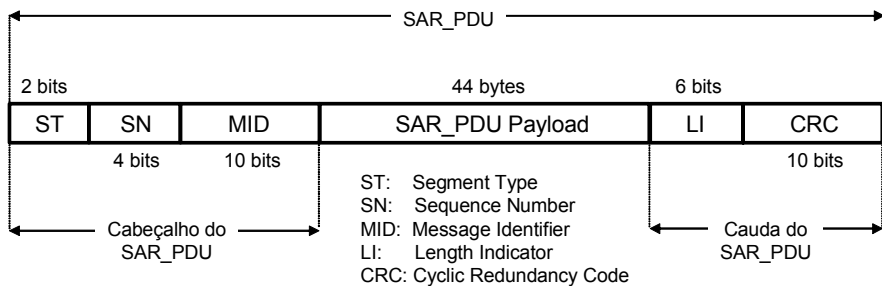
Figura 3-24: Unidade de dados do protocolo para a subcamada SAR do AAL-3/4.

O campo ST indica se a PDU que resulta da segmentação de uma mensagem da subcamada superior CS é o primeiro segmento, um segmento de continuação, o último segmento ou um segmento único. Este mecanismo é idêntico ao descrito para os serviços do tipo 2. O campo SN tem funcionalidade idêntica à descrita para a PDU da classe A. O campo MID permite multiplexar, ao nível da SAR, PDUs pertencentes a diferentes mensagens da subcamada CS.

Os dois últimos octetos da PDU (cauda) têm os campos LI (LI, *Length Indicator*) e CRC (CRC, *Cyclic Redundancy Code*). O campo LI indica, no caso do último segmento ou segmento único, quantos octetos no campo de informação da subcamada CS correspondem à mensagem que foi segmentada. O campo CRC é baseado num polinómio gerador $G(x) = x^{10}+x^9+x^5+x^4+x+1$ e protege contra erros todo o campo de informação da célula (SAR-PDU).

O formato do CPCS-PDU é ilustrado na Figura 3-25. É constituído por um cabeçalho e uma cauda de 4 octetos. O campo CPI é usado para interpretar os restantes campos do cabeçalho e da cauda. Os campos Btag e Etag servem para delimitar a unidade de dados, o campo BASize indica, à entidade semelhante do lado do receptor, os requisitos de memória necessários para receber o CPCS-PDU e o campo PAD garante que o tamanho do *payload* do CPCS-PDU seja múltiplo de 4 octetos e não transporta informação útil. De forma idêntica, o campo AL permite um alinhamento de 32 bits da cauda do CPCS-PDU. Finalmente, o campo Length é usado para definir o comprimento do *payload* do CPCS-PDU e permite ao receptor detectar a perda ou má inserção de dados.
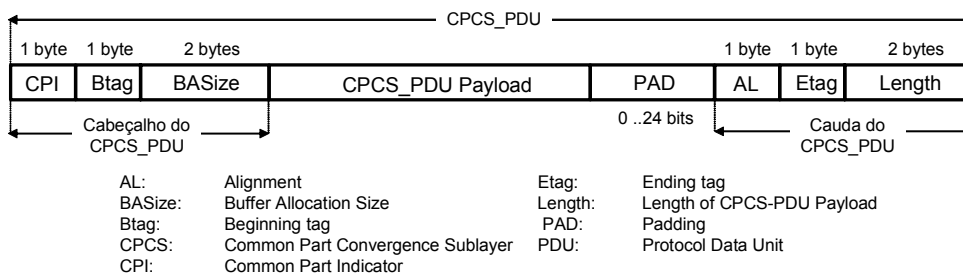
Figura 3-25: Unidade de dados do protocolo para a subcamada CPCS do AAL-3/4.

AAL - Tipo 5

Este tipo de AAL suporta serviços de débito variável em que existe uma relação temporal entre fonte e destino (Classe D) e caracteriza-se por suportar, duma forma eficiente, a transferência de grandes blocos de informação através da utilização da totalidade da capacidade da unidade de dados do protocolo (SAR-PDU). A grande diferença entre este e o AAL-3/4 reside na impossibilidade do AAL-5 suportar directamente a função de multiplexagem.

O AAL-5 é subdividido nas subcamadas SAR e CS de forma idêntica ao AAL-3/4 (Figura 3-21).

A subcamada SAR aceita SDUs de tamanho múltiplo de 48 octetos da subcamada CPCS. Nenhum campo de controlo é adicionado aos SDUs recebidos, ao nível da SAR, sendo apenas efectuadas as funções de segmentação e reunião[3]. Para detectar o início e o fim de um SAR-PDU recorre-se ao parâmetro AAU (ver secção 3.3.1.2). O valor 1 do campo PT (PT, *Payload Type*) do cabeçalho da célula ATM, indica o fim, enquanto que o valor 0 o início ou a continuação de um SAR-PDU. Deste modo, o campo ST (existente no AAL-3/4) não é usado.

Uma vez que o AAL-5 usa informação veiculada no cabeçalho da célula ATM, as operações efectuadas contrariam, em parte, as directivas especificadas no PRM nos aspectos de independência e modularidade das camadas. No entanto, esta técnica foi adoptada devido à sua simplicidade e eficiência.

A subcamada de convergência é subdividida em CPCS e SSCS. As funções implementadas na subcamada SSCS são dependentes da aplicação e podem nem existir. Uma possível aplicação é a multiplexagem de diferentes conexões AAL de forma idêntica à efectuada no AAL-3/4 usando o campo MID.

Na Figura 3-26 representa-se a última unidade de dados do protocolo para a subcamada CPCS da camada de adaptação do AAL-5. A subcamada CPCS permite a transferência de estruturas de dados de nível superior de tamanho variável entre 1 e 65535 octetos especificado pelo campo *Length*. O campo UU permite a transferência transparente, extremo-a-extremo, de informação entre entidades de nível superior, em cada CPCS-PDU, o campo CPI tem funções idênticas às usadas no AAL-3/4 e o campo CRC é usado para a detecção de erros. O campo PAD é usado para ajustar o comprimento do bloco de informação ao valor de 48 octetos.

---

[3] Com a excepção da última CPCS-PDU, todas as anteriores apresentam um *payload* de 48 octetos, de comprimento igual ao da respectiva SDU, uma vez que não é adicionado qualquer cabeçalho. Por esta razão, este tipo de segmentação e reunião, também é conhecido por AAL-0.
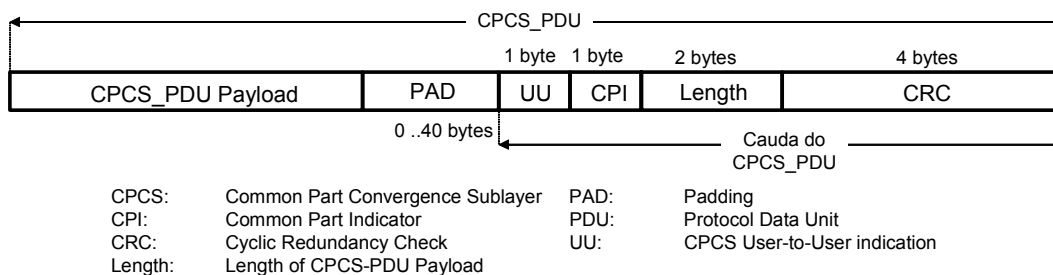
Figura 3-26: Unidade de dados do protocolo para a subcamada CPCS do AAL-5.

3.3.1.4 A Camada Física

A camada Física está dividida em duas subcamadas. A subcamada superior, chamada subcamada de Convergência para a Transmissão e a camada inferior, chamada subcamada do Meio Físico. As funções principais da subcamada de convergência para a transmissão são:

- Adaptação do fluxo de células ao sistema de transmissão usado. Isto é conseguido através da inserção de células vazias de modo a preencher a capacidade de transmissão não usada,
- Construção do formato de trama do sistema de transmissão usado,
- Processamento dos campos de controlo das tramas de nível físico,
- Inserção e remoção de células ATM de e para o nível físico,
- Delimitação de células,
- Detecção de erros através da análise do cabeçalho da célula ATM.

Na camada inferior (subcamada do meio físico), a realização das suas funções está inteiramente dependente do meio de transmissão utilizado. As funções principais realizadas são:

- codificação de linha,
- regeneração de bits,
- conversão electro-óptica.

Delimitação de células e controlo de erros

O mecanismo de delimitação da célula é baseado na correlação que existe entre o valor do cabeçalho da célula e o campo HEC para controlo de erros no cabeçalho. O campo HEC é um

octeto que corresponde ao resto da divisão módulo 2, do cabeçalho da célula, excluindo o HEC, multiplicado por 8, pelo polinómio gerador x^8+x^2+x+1. A utilização do HEC permite corrigir um bit e detectar múltiplos bits em erro. O procedimento para controlo de erros na recepção com base no campo HEC está descrito na Figura 3-27.
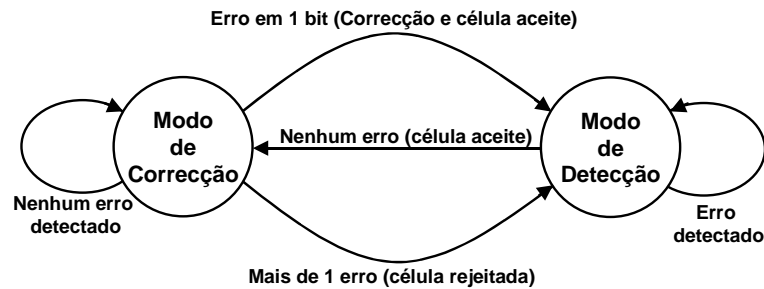
Figura 3-27: Diagrama de estados para o controlo de erros na recepção.

Existem dois modos de operação no receptor: correcção e detecção. O modo inicial é o de correcção, existindo a capacidade no receptor de corrigir um bit errado. Cada cabeçalho recebido é examinado e, se for detectado um erro, a acção a executar depende do modo de operação do receptor. No modo de correcção, se for só um bit errado, este é corrigido; se ocorrerem erros em mais de um bit, a célula é rejeitada. Em ambos os casos, o receptor comuta em seguida para o modo de detecção. Neste, todas as células com erros no cabeçalho são rejeitadas, mantendo-se o receptor no modo de detecção. Quando ocorrer um cabeçalho sem erros, o receptor volta ao modo de correcção. Devido a este procedimento, o receptor tem possibilidades de reagir às situações de erros isolados ou em rajadas.

O mecanismo de delimitação de célula tem o diagrama de estados indicado na Figura 3-28. Este diagrama de estados ocorre na recepção e tem o estado de Fora de Sincronismo como estado inicial.
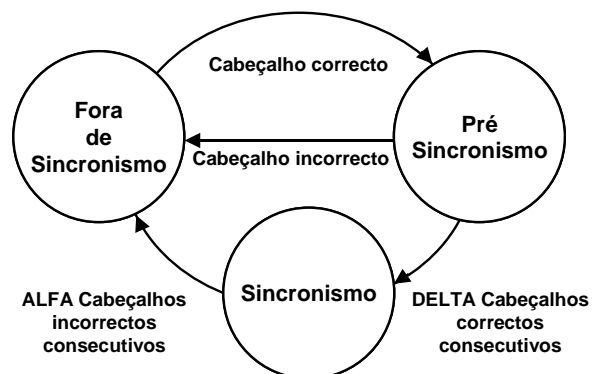
Figura 3-28: Diagrama de estados para o processo de delimitação de células.

O procedimento para se atingir o estado estável de funcionamento (Sincronismo) a partir do estado inicial é o seguinte: no estado Fora de Sincronismo é verificado, bit a bit, se a codificação do HEC em relação ao valor do resto do cabeçalho está correcta. Assim que se encontrar um valor correcto, presume-se que se está em presença de um cabeçalho correctamente delimitado e passa-se ao estado Pré-Sincronismo. Este mecanismo repete-se até que se encontrem HEC's correctos durante DELTA células consecutivas, passando-se nessa altura ao estado Sincronismo, considerando-se o processo de delimitação da célula concluído. Perder-se-á esta delimitação se ocorrerem HEC's incorrectos durante ALFA vezes consecutivas, voltando-se ao estado inicial[4].

De modo a aumentar a segurança do processo de delimitação de células em relação a eventuais simulações do HEC correcto no campo de informação, os bits do campo de informação são misturados por um processo aleatório antes da informação ser enviada para a rede, por um sistema conhecido por *scrambler*, baseado num conjunto de registos de deslocamento com realimentação.

Na recepção, após o procedimento de delimitação de célula, existe um mecanismo inverso que permite reconstituir o campo de informação original.

Sistemas de Transmissão de células ATM

Em geral, qualquer sistema de transmissão com baixa taxa de erros e largura de banda adequada é candidato ao transporte de células ATM. No entanto, os sistemas de transmissão baseados nas hierarquias digitais síncronas e plesiócronas são os que estão implementados em maior número.

Nas hierarquias digitais síncronas, os sistemas SDH (SDH, *Synchronous Digital Hierarchy*) e SONET (SONET, *Synchronous Optical NETwork*) estão bastante implementados a 155Mbit/s embora sejam usados os débitos de 52Mbit/s (SONET) e 622Mbit/s (SONET e SDH), sendo este último cada vez mais vulgar devido às solicitações crescentes de maior largura de banda.

Nas hierarquias plesiócronas, os sistemas E1 e E3, com débitos de 2Mbit/s e 34Mbit/s, respectivamente são os mais usados na Europa enquanto que os sistemas DS-1 e DS-3 com débitos de 1.5Mbit/s e 45Mbit/s, respectivamente são os mais usados nos EUA.

---

[4] Os valores de ALFA e DELTA poderão ser ajustados aos diferentes sistemas de transmissão, sendo os valores de ALFA= 7 e DELTA = 6 ou 8, recomendados para as interfaces de 155 520 kbit/s.

Seguidamente é feita uma breve descrição sobre a forma como são transmitidas as células nas hierarquias digitais síncronas.

- **Transmissão de células nas hierarquias digitais síncronas**

No caso do transporte de células ATM, tanto a rede SDH como a rede SONET usam o formato de dados de transporte VC-4, tornando-se as diferenças entre estas duas redes praticamente nulas no contexto das redes B-ISDN. A Figura 3-29 mostra a forma como são transportadas as células na trama STM-1 da rede SDH.
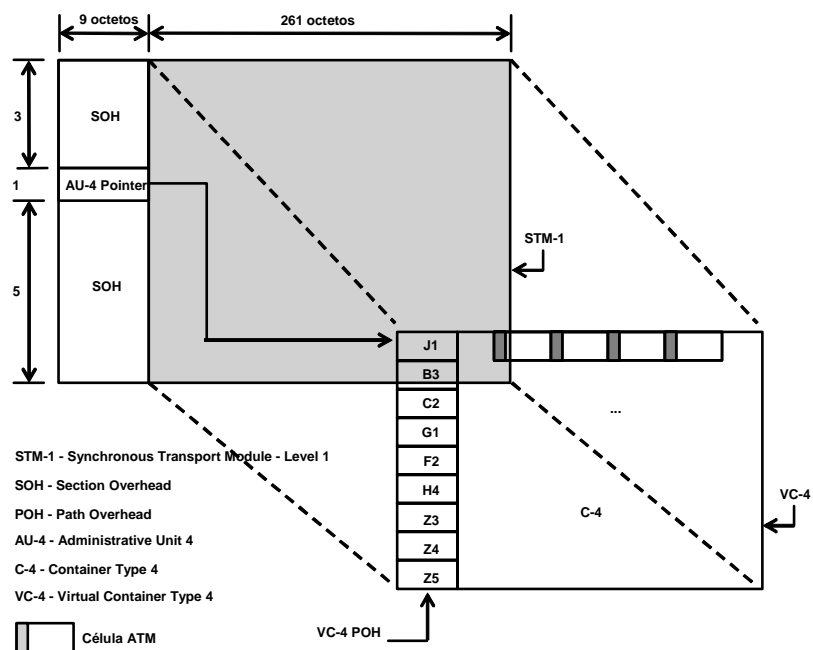
Figura 3-29: Transporte de Células ATM na rede SDH.

Na emissão, as células são colocadas em contentores do tipo C-4 com capacidade de 9 X 260 octetos. A este contentor virtual é adicionado um conjunto de 9 X 1 octetos de controlo chamados de POH (POH, *Path Overhead*) resultando no contentor virtual VC-4 que, em seguida, é mapeado na trama STM-1. Esta, além do contentor virtual VC-4 é composta por uma estrutura de controlo de 9 X 9 octetos chamada de SOH (SOH, *Section Overhead*). Um destes campos (AU-4, *Administrative Unit* 4) contém um apontador que indica a posição, na trama, onde se inicia a transmissão das células.

A capacidade útil de transmissão desta estrutura é de 260 X 9 = 2340 octetos. Este valor como não é múltiplo do tamanho das células ATM, faz com que a posição ocupada por estas não seja fixa como ilustra a Figura 3-29. Deste modo, a delimitação das células na recepção é efectuada

à custa do processamento do cabeçalho da célula, da forma referida anterioriormente, ou através do processamento do campo H4 do VC-4 POH que indica a posição do contentor virtual VC-4 onde se localiza o início da primeira célula transportada na trama seguinte.

3.3.1.5 Configurações de Referência

Uma configurações de referência é uma representação esquemática em que são definidas claramente a interface entre as várias entidades da rede e as funções das diferentes entidades.

A configuração de referência usada na RDIS-BL, correspondente à interface utilizador-rede, é derivada da utilizada na RDIS e vem descrita na recomendação I.411 do ITU-T [ITU93e]. A Figura 3-30 representa a configuração de referência para a interface utilizador-rede. É constituída por pontos de referência e grupos funcionais.
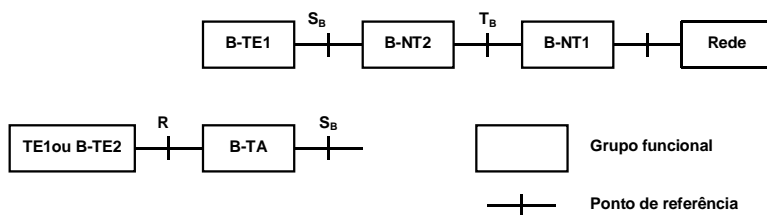
Figura 3-30: Configuração de referência para a interface utilizador-rede.

A interface utilizador-rede é definida no ponto de referência T_B. Nesta configuração de referência existem cinco grupos funcionais: B-NT1, B-NT2, B-TE1, B-TE2 e B-TA.

O grupo funcional Terminação de Rede 1 (B-NT1, *Broadband Network Termination* 1) está localizado nas instalações do utilizador mas, na Europa, pertence ao operador de telecomunicações. É o elemento final na linha de transmissão para a rede, englobando os componentes necessários para garantir o funcionamento correcto da ligação na instalação do utilizador no ponto T_B.

O B-NT1 só inclui funções da camada física nomeadamente a terminação da linha de transmissão, interface de transmissão e funções de operação e manutenção (OAM, *Operation and Maintenence*) [ITU93b].

O grupo funcional Terminação de Rede 2 (B-NT2, *Broadband Network Termination* 2) é o núcleo da rede na instalação do utilizador. O B-NT2 pode desempenhar as funções de concentrador, multiplexer / demultiplexer ou de comutador privado podendo, neste último caso,

ter uma implementação concentrada ou distribuída. O B-NT2 engloba não só funções da camada física mas também das camadas superiores.

O equipamento terminal de tipo 1 (B-TE1, *Broadband Terminal Equipment* 1) será um terminal compatível com as características ATM da interface no ponto de referência S_B, enquanto que o equipamento terminal de tipo 2 (TE2, *Terminal Equipment* 2) não possui essa compatibilidade, necessitando de um Adaptador de Terminal (B-TA, *Broadband Terminal Adaptor*) para se poder ligar a S_B.

Existem três pontos de referência na configuração: R, S_B e T_B. As características da interface em R dependem do tipo de TE2 que estiver a ser adaptado para ATM. No que respeita a S_B e T_B, em ambos poderá ser suportado um débito de 155.520kbit/s ou 622.080kbit/s, embora as recomendações avancem mais na definição das características básicas para 155.520kbit/s. Em regra, existe uma certa compatibilidade das características em S_B e T_B, de modo a permitir ligar directamente um equipamento terminal em $T_{B.}$

Em T_B, para 155.520kbit/s, são recomendadas quer interfaces ópticas, quer eléctricas. A solução escolhida depende da distância a ser coberta e dos requisitos do utilizador. Em qualquer dos casos, será feita uma ligação ponto-a-ponto.

A configuração de referência pode ser implementada fisicamente de diversas maneiras. A Figura 3-31 mostra algumas configurações possíveis.
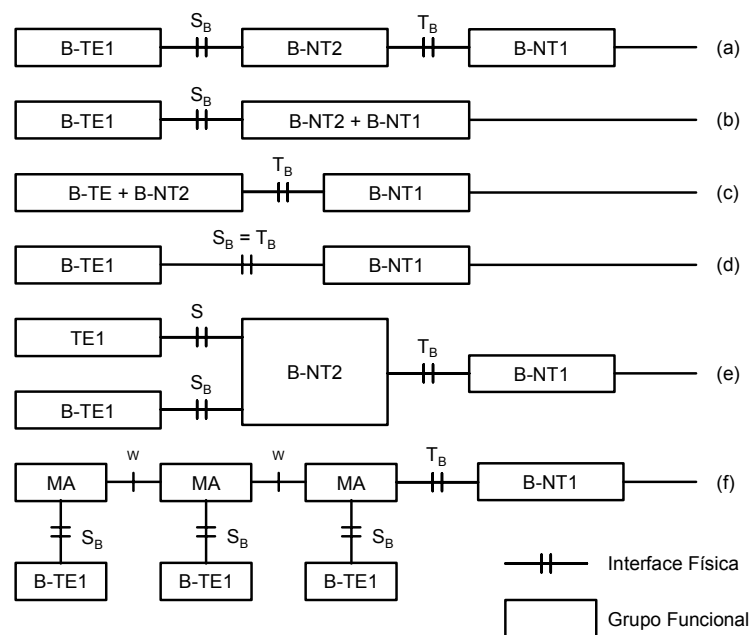
Figura 3-31: Exemplos de algumas configuração físicas na interface utilizador-rede.

No caso (a) são implementadas fisicamente as interfaces nos pontos S_B e T_B. No caso seguinte (b), apenas a interface em S_B está fisicamente presente. Aqui, B-NT1 e B-NT2 são agrupadas numa entidade única. Na caso (c) apenas a interface em T_B é implementada fisicamente, resultando uma entidade que agrupa B-TE e B-NT2. Em (d) os pontos S_B e T_B são coincidentes e, por isso, idênticos. Neste caso não existe B-NT2 nas instalações do utilizador. No caso (e) as interfaces físicas entre terminais e B-NT2 são S_B e S (para RDIS), baseadas num agrupamento centralizado de B-NT2. Como já foi referido, B-NT2 pode ser igualmente distribuído. Uma configuração possível é representada na Figura 3-31(f). O MA (MA, *Medium Adaptor*) implementa um mecanismo de acesso ao meio, de modo a que todos os terminais possam aceder à rede. Estes MA's são totalmente dependentes da topologia utilizada e as suas funções não serão objecto de normalização. Neste exemplo, a interface W poderá ser igualmente dependente da topologia e também não será normalizada. No entanto, poderão existir soluções em que W é idêntica a S_B.

Síntese

Este capítulo faz a descrição de algumas tecnologias de suporte da infra-estrutura de comunicação para sistemas de aquisição de dados e controlo.

Em primeiro lugar foram abordadas as tecnologias de redes de área local (LANs), onde se descrevem, duma forma sumária, as principais topologias de rede e os métodos de acesso ao meio mais vulgarmente utilizados, sendo igualmente descrito com um maior detalhe a norma Ethernet, desde a sua variante original até ao Gigabit Ethernet.

Em segundo lugar foram descritos os principais barramentos de campo. Estes, são redes locais simplificadas do ponto de vista da dimensão, formato de tramas de dados e capacidade de transmissão. A área das redes industriais encontrava-se inicialmente dominada por soluções proprietárias, as quais estavam frequentemente orientadas para áreas de aplicação específicas. Mais recentemente, redes industriais normalizadas começaram a ser utilizadas com maior frequência. Neste contexto, foram apresentadas as características principais dos protocolos CAN e PROFIBUS e duma forma mais resumida os protocolos P-NET e WorldFIP.

Finalmente, foi descrito com detalhe o modo de transferência ATM como suporte de transmissão, comutação e multiplexagem da RDIS-BL. À semelhança do Modelo OSI,

o modelo de referência de protocolos satisfaz os princípios da modularidade e independência da tecnologia, definindo os serviços e os protocolos por camadas e as respectivas primitivas de serviço. A camada de Adaptação ATM permite fazer a adaptação de um serviço específico à rede, de modo a tornar a camada ATM independente do serviço e da tecnologia de transmissão. A camada Física efectua, entre outras funções, a adaptação ao meio físico de transmissão, a delimitação das células, correcção de erros do cabeçalho e adaptação do fluxo de células ao sistema de transmissão. Em geral, qualquer sistema de transmissão com baixa taxa de erros e largura de banda adequada é candidato ao transporte de células ATM. No entanto, os sistemas de transmissão baseados nas hierarquias digitais síncronas e plesiócronas são os que estão implementados em maior número. Por esta razão, foi ilustrada a forma como é efectuado o transporte de células ATM na Rede SDH, sendo caracterizadas as interfaces de acesso e apresentada a configuração de referência para a interface utilizador-rede.

4

Adaptação de tráfego de baixo débito em aplicações de controlo

Uma vez apresentadas as principais tecnologias de suporte da infra-estrutura de comunicação para a adaptação do tráfego de baixo débito em aplicações de controlo, é agora altura de discutir este problema, em termos de cenários de aplicação, tipos de dispositivos a interligar, referenciais de Qualidade de Serviço (QoS, *Quality of Service*) suportados bem como a arquitectura de referência.

Neste capítulo também se caracteriza funcionalmente o desempenho daquelas tecnologias de rede, em função dos atrasos e das capacidades de transmissão. É igualmente apresentada uma solução concreta para a adaptação do tráfego de baixo débito em aplicações de controlo, que inclui uma descrição sumária do sistema proposto, baseada em Adaptadores de terminal e um Concentrador, que incorporam funções de escalonamento de tráfego.

4.1 Caracterização do problema

Normalmente, uma rede de sensores é formada por um grande número de pequenos dispositivos, cujo principal objectivo é detectar e transmitir alguma característica física do ambiente [Per03]. Estes componentes ou nós podem ser utilizados de forma eficiente, mesmo

que sejam milhares, para atingir um objectivo comum. Uma outra visão que se pode ter deste tipo de redes é a de um conjunto de nós individuais que operam isolados, mas que podem formar uma rede com o objectivo de coleccionar as informações individuais de cada sensor para monitorar algum fenómeno. Por vezes, estes nós movem-se juntamente com o fenómeno observado (e.g., sensores colocados em animais para observar o seu comportamento).

As redes de sensores possuem como características principais: o sensor, o observador e o fenómeno. O sensor é o dispositivo que implementa a monitoração física de um fenómeno produzindo uma resposta mensurável a mudanças em condições físicas, tais como temperatura, campo magnético e luz [Meg02]. Muitos modelos de complexidade variada podem ser construídos baseados na necessidade da aplicação e características dos dispositivos. Uma rede de sensores é uma ferramenta para medir e passar informação sobre o fenómeno para o observador dentro do limite de desempenho desejado. O observador efectua consultas que podem ser estáticas (os sensores são programados para fornecer dados de acordo com um padrão específico) ou dinâmicas. A rede pode participar na sintetização da consulta. Por exemplo, filtrando alguns dados dos sensores ou fundindo diversas medidas num valor. As optimizações nestes três níveis são possíveis para melhorar o desempenho.

Um sistema de controlo integra um grande número de sensores, actuadores e respectivas entidades de controlo. Por isso, mesmo que a interligação de cada par de dispositivos terminais apresente débitos baixos e exija atrasos de transmissão moderados, os débitos globais suportados pela rede poderão atingir valores elevados e atrasos que, se não forem controlados, poderão tornar-se inaceitáveis.

4.1.1 Cenários de Aplicação

Estão identificadas inúmeras aplicações em que é necessário que os sistemas de aquisição de dados e controlo suportem a cobertura de áreas de grande dimensão e mesmo geograficamente dispersas. Eis alguns exemplos:

- estufas agrícolas,
- unidades de agro-pecuária,
- indústria têxtil,
- estações meteorológicas,
- sistemas de detecção de fogos florestais.

Os sensores podem também ser usados para monitorar ambientes que sejam de difícil acesso ou perigosos, tais como o fundo do oceano, vizinhanças de actividades vulcânicas, territórios inimigos, áreas de desastres e campos de actividade nuclear. Estes podem também ser usados em tarefas interactivas, como encontrar e detonar explosivos, ou procurar sobreviventes de desastres naturais.

Sistemas sensoriais e periciais

Os sistemas sensoriais e de actuação [Cun04] têm vindo a ser aplicados com sucesso em robots para fins agrícolas. Actualmente, existem várias aplicações destes sistemas podendo referir-se como exemplo a aplicação de tratamentos e a administração de adubos foliares em estufas e os tractores de campo para aplicação controlada de químicos. Um exemplo deste tipo de equipamentos é o de um tractor de aplicação de pesticidas que possui 8 sensores de ultra-sons instalados num braço para controlo individual da altura dos injectores ao solo com vista a aumentar a eficiência do emprego dos tratamentos [Ant00].

A utilização de tecnologias que permitam obter informação sobre os processos fisiológicos e químicos que ocorrem nas plantas, tais como: informação relativa à fotossíntese, potenciais hídricos, fluxos de água e de nutrientes nos caules e distribuição na matéria assimilada, apesar do seu grande interesse, está actualmente condicionada por razões de índole prática, pela grande quantidade de sensores que é necessário interligar para assegurar a representatividade do estado da cultura, e de ordem técnica devido a limitações tecnológicas que impossibilitam obter informação directa de muitos dos fenómenos fisiológicos importantes. Algumas destas técnicas baseiam-se na digitalização de imagens das folhas para medir as suas áreas, na aplicação de impulsos térmicos no caule e na utilização da ressonância magnética nuclear para medir os fluxos de água e nutrientes [Pee96], [Shi96].

A aplicação de sensores de imagem e de técnicas de aquisição e processamento de imagem por computador na agricultura têm também vindo a acentuar-se ao longo dos últimos anos, podendo referir-se como exemplo o desenvolvimento de dispositivos munidos de sistemas de visão guiada para aplicação selectiva de herbicidas [Lei02].

Uma outra área de aplicação que recentemente começou a ser automatizada é a da classificação e selecção de frutos com base nos atributos da dimensão e cor. Nesta área de aplicação da visão por computador, o ser humano é substituído por máquinas para efectuar as operações de inspecção visual que, com base na cor, mede a qualidade do fruto e com base na dimensão efectua a selecção do calibre [Cru02].

A recolha de grandes quantidades de informação requer sistemas de processamento capazes de gerar em tempo-real as decisões mais adequadas ao processo produtivo. Dada a interdependência e a complexidade dos vários factores envolvidos na gestão dos processos agro-industriais, os sistemas de supervisão, os sistemas periciais e a inteligência artificial têm vindo a assumir um papel fundamental na implementação de estratégias de automação e gestão integradas. Diversos sistemas periciais de ajuda ao produtor no diagnóstico e resolução de problemas específicos, como sejam o diagnóstico de doenças, entre outros, têm vindo a ser aplicados com sucesso à agricultura [Gre94], [Bea95].

De uma forma simples, um sistema pericial pode ser definido como um programa de computador que substitui um especialista humano na assistência a um utilizador no diagnóstico de problemas, na selecção de alternativas e na gestão de sistemas. O sistema é composto por um módulo de conhecimento, um de inferência que analisa o anterior e uma interface com o utilizador, como ilustrado na Figura 4-1.
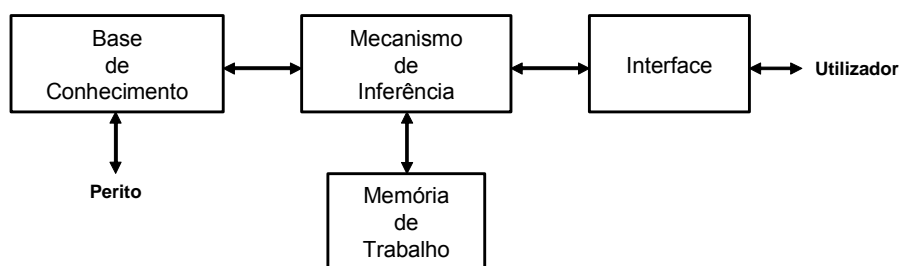
Figura 4-1: Diagrama de blocos de um sistema pericial.

O módulo de conhecimento contém informação e estratégias geralmente obtidas de especialistas, por forma a poderem tomar-se decisões complexas num domínio específico.

Como exemplos de aplicações de sistemas periciais à agricultura podem referir-se os trabalhos de análise e decisão dos nutrientes a fornecer às plantas com base na radiação solar e na resposta destas [Fyn94], de determinação dos valores ambientais diários desejados para a produção de tomate no Inverno, balanceando os objectivos de evitar doenças, manter o desenvolvimento da cultura e minimizar o consumo energético [Mor00], e de diagnóstico de doenças em abelhas [McC93].

Os exemplos apresentados atrás caracterizam-se, em geral, por recolherem informação em diversos locais, onde ocorrem diversos fenómenos que são traduzidos em grandezas mensuráveis (e.g. tensão e corrente eléctrica). A informação é convertida para formato digital de forma a ser processada e enviada através de uma rede de comunicação. A Figura 4-2 ilustra um cenário genérico onde os exemplos anteriores se podem incluir.
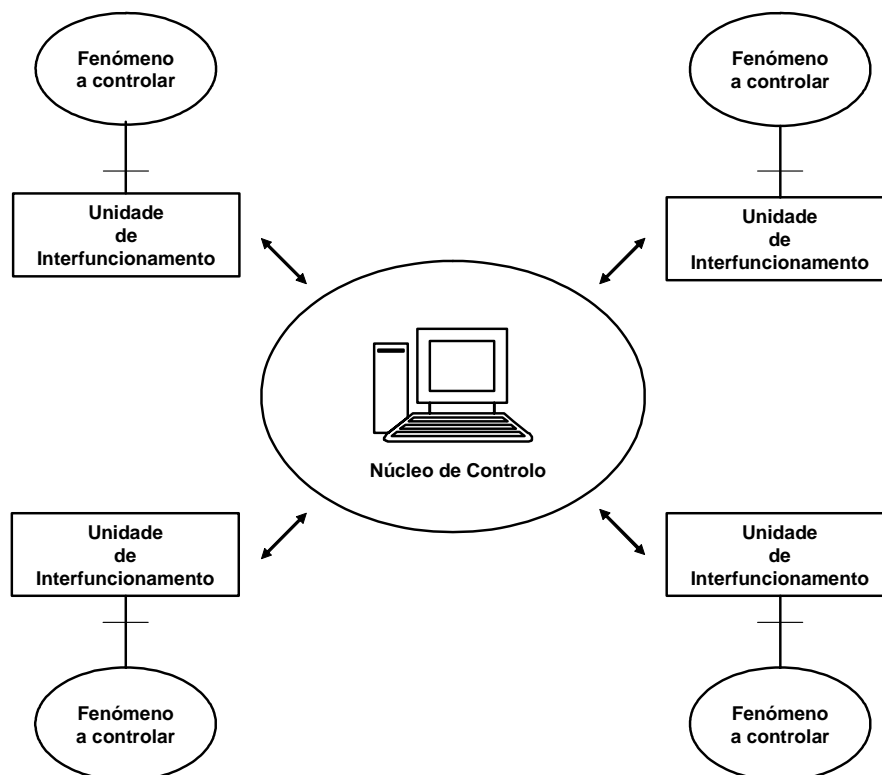
Figura 4-2: Cenário genérico de suporte a aplicações de controlo.

O cenário genérico apresentado na Figura 4-2 caracteriza-se pela existência de um núcleo central de controlo que necessita de recolher e enviar informação de e para os dispositivos associados ao fenómeno envolvido numa dada aplicação.

A informação é recolhida numa unidade central que se encarregará de processar a informação recebida. Uma aplicação de controlo poderá limitar-se a informar o observador acerca do fenómeno observado, fornecendo informação (i.e. medidas, estatísticas, amostras) acerca deste; ou poderá interagir com o próprio fenómeno, ou qualquer elemento relacionado com este, como reacção aos dados recebidos.

- **Núcleo de controlo**

Poderá ser constituído por uma estação de trabalho onde existirão os programas necessários ao controlo de toda a aplicação.

- **Unidade de Interfuncionamento**

Este módulo permitirá efectuar a conversão da informação recolhida, pelos dispositivos em formatos de dados passíveis de poderem ser transportados de forma eficiente para a aplicação e em sentido inverso.

- **Fenómeno a controlar**

Em função das características associadas a um determinado fenómeno, poderão existir dispositivos de diversos tipos e com diferentes características físicas que permitirão recolher a informação acerca das grandezas a medir. Por outro lado, em resposta à informação recolhida pela aplicação, poderá ser necessário intervir no fenómeno. Neste caso a informação será enviada, em sentido inverso, para dispositivos actuadores que desencadeiam acções susceptíveis de alterar o fenómeno a controlar.

Este tipo de aplicações poderá envolver sistemas, dispersos por diferentes áreas geográficas, que podem variar desde uma pequena propriedade rural até áreas que podem envolver um conjunto de países. Deste modo, será conveniente que a infra-estrutura de transporte da informação seja flexível de forma a adaptar-se às necessidades da aplicação, quer em termos de custos, quer em termos de operação e manutenção.

4.1.2 Tipos de dispositivos a interligar

A secção anterior apresentou alguns exemplos de aplicações de controlo industrial em diversas áreas de intervenção. Importa agora identificar os dispositivos terminais e suas principais características de forma a poder sistematizar a análise do problema e assim poder definir a arquitectura do sistema e os critérios de QoS necessários para o seu dimensionamento, selecção da tecnologia de suporte e análise de desempenho.

Eis alguns exemplos de sistemas concretos, ou seus componentes, que podem ser integrados numa aplicação de controlo.

- **Sensores de temperatura**

Estes sensores estão normalmente ligados em placas de aquisição de dados, ou em módulos que produzem informação sob a forma digital. No caso de aplicações relacionadas com a monitorização da temperatura ambiente, a grandeza a medir varia lentamente, enquanto que em processos onde existem fontes de calor artificiais a variação pode ocorrer mais rapidamente. Os períodos de aquisição de sinais desta natureza podem variar desde alguns décimos de segundo, por exemplo em máquinas de secagem de produtos têxteis [Ari02] até alguns minutos, por exemplo em estações meteorológicas [Aud05].

- **Sensores de humidade**

Aplicação idêntica à anterior. Apenas é usado um sensor que mede uma grandeza física diferente.

- **Sensores de luminosidade**

Aplicação idêntica às anteriores. Neste caso a grandeza a medir é a quantidade de luz absorvida pelo sensor. Os processos em que são usados este dispositivos são também caracterizados por constantes de tempo elevadas. Tal como as 2 anteriores, existem aplicações em que a luminosidade deve ser medida com intervalos de nano-segundos [Man03], de alguns minutos em estações meteorológicas e algumas horas em observações de astros.

- **Sensores de estado**

São dispositivos muito simples que apenas indicam o valor de um estado binário ("*On / Off*). Podem indicar-se como exemplos o simples detector de estado de um interruptor, detectores de estados de paragem de máquinas industriais e detectores de "fim de curso". Caracterizam-se por produzirem, esporadicamente, quantidades de informação muito baixas (i.e. um bit). A informação gerada por estes sensores pode necessitar de atrasos de transmissão muito baixos.

- **Dispositivos de actuação múltipla**

Um painel de comando é normalmente constituído por um conjunto de interruptores. Consoante o interruptor actuado, é enviado o endereço correspondente. Neste caso, é enviado um octeto sempre que é accionado um interruptor. O atraso de propagação, entre o painel de comando e o actuador correspondente, dependerá da aplicação em causa. Por exemplo, se a acção de comando for ligar a iluminação de uma sala, o atraso não necessita de ser baixo, enquanto que se o comando for no sentido de interromper um processo de fabrico, devido à ocorrência de uma falha, esse atraso deverá ser o mais reduzido possível no sentido de reduzir os danos associados a essa falha.

- **Dispositivos de Voz**

Esta aplicação consiste num serviço de voz de qualidade equivalente à do serviço telefónico tradicional, com débitos de 16kbit/s ou de 8kbit/s de acordo, respectivamente, com as especificações G.728 [ITU92] ou G.729 [ITU96] do ITU-T. Um exemplo de aplicação será a existência de um canal bidireccional de comunicação voz entre o local onde está situado o processo de controlo e o local onde se situa a aplicação de controlo. Nesta aplicação, o atraso

máximo extremo-a-extremo da informação não deverá exceder os 150ms [Iye97]. No caso de transmissão unidireccional, o atraso poderá ser bastante maior e será função do tamanho dos *buffers* de recepção da aplicação em causa.

- **Dispositivos de aquisição de imagens e de vídeo**

Existem vários exemplos de aplicação de dispositivos de aquisição de imagens em processos de controlo industrial. Um exemplo de aplicação simples é o de sistemas de captação de imagens de baixa qualidade, destinadas a aplicações de vigilância, em que se consideram débitos médios na ordem dos 80kbit/s [Pix02]. Em relação ao atraso, o valor máximo dependerá do tamanho do *buffer* de recepção que acomodará as suas variações no sentido de as imagens serem visualizadas sem perturbações. Um outro tipo de aplicações são os chamados “sistemas de visão” em que, através da análise de imagens por computador, se obtém informação acerca de um determinado processo [Cru02], [Fro04], [Jia04]. Neste casos, as imagens recolhidas pelas várias câmaras são enviadas para uma unidade central, onde reside a aplicação, que efectuará todo o processamento no sentido de obter a informação desejada. Os débitos produzidos nestes dispositivos variam em função da resolução das imagens, da quantidade de imagens enviadas por unidade de tempo e do número de câmaras associadas a um determinado processo.

Além dos dispositivos referidos existem outros tipos de sensores (e.g. sensores de pressão, detecção de velocidade, detectores de movimento) que, vistos do ponto de vista da adaptação do tráfego à rede, exibem um comportamento idêntico a um dos atrás mencionados.

4.1.3 Referenciais de QoS suportados

Em função dos requisitos dos diversos dispositivos e aplicações, será necessário definir formas de agregar tráfego, quer ao nível do transporte, quer ao nível da aquisição. No primeiro caso, parece evidente que a agregação de tráfego permitirá transportar os diversos fluxos de informação duma forma mais eficiente (i.e. menores custos de transmissão). No segundo caso, a agregação de tráfego ao nível da aquisição permitirá essencialmente resolver situações em que existem dispositivos que geram tráfego de muito baixo débito (e.g. sensores de estado, alarmes) e de forma ocasional, o que introduz a necessidade de juntar, em unidades de dados elementares, a informação gerada por vários dispositivos e, assim, aumentar a eficiência de transmissão.

O tráfego gerado pelos diversos dispositivos requer, ao nível do transporte da informação, diversos níveis de QoS tais como o atraso de transmissão e a taxa de perdas de informação. Deste modo, neste tipo de aplicações será necessário definir mecanismos que permitam identificar diferentes tipos de requisitos em função dos objectivos a atingir.

Classes de tráfego

Importa agora caracterizar, duma forma clara, a forma como os diferentes fluxos, associados ao tráfego gerado pelos diferentes dispositivos e sistemas apresentados, vão ser tratados pelo sistema de agregação de tráfego. Neste sentido, são definidas três classes de tráfego associadas a diferentes níveis de desempenho suportado pelo sistema de controlo:

- **Atraso Máximo (AM)**

Os fluxos associados a esta classe necessitam da garantia de um atraso máximo, bem definido, entre o dispositivo e a Aplicação de controlo. Esta classe é vocacionada para serviços de tempo-real. Como exemplos, podem ser referidos o serviço de voz interactivo e aplicações em que a leitura de um sensor desencadeia o envio de informação para um actuador dentro de um limite temporal bem definido.

- **Dados (D)**

Nesta classe, os fluxos associados necessitam apenas que lhes seja garantida a entrega da informação sem requisitos temporais. Esta classe é vocacionada para serviços do tipo *unicast*, em que a informação é enviada de um extremo para o outro da rede e em que o processamento da informação não requer o envio de informação em sentido inverso com restrições temporais.

- **Esforço Mínimo (EM)**

Quando a perda ocasional ou o atraso na entrega de informação não afectam determinado processo, podemos usar esta classe de tráfego. Por exemplo, quando estamos a monitorar a temperatura ambiente, a ocorrência de um erro numa leitura poderá não ser grave, uma vez que uma aplicação o poderá detectar facilmente.

4.1.4 Arquitectura de referência

De modo a sistematizar e organizar os conceitos até agora apresentados importa definir uma arquitectura de referência para aplicações de controlo centralizado, em que os diversos processos, associados a diferentes fenómenos, enviam a informação para uma entidade de controlo que poderá enviar informação, em sentido inverso, como resultado do processamento dos dados recebidos. Esse modelo é apresentado na Figura 4-3.
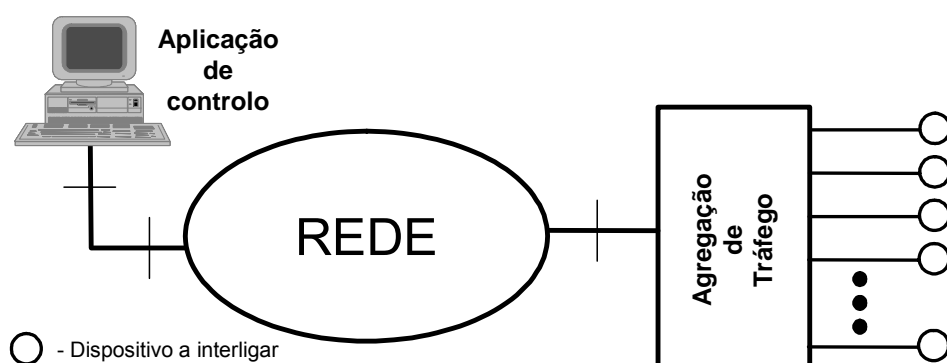
Figura 4-3: Arquitectura de referência para aplicações de controlo.

Esta arquitectura de referência é constituída por três componentes fundamentais:

- Rede de suporte,
- Sistema de agregação de tráfego,
- Aplicação de controlo.

Este modelo pretende ser genérico de forma a poder ser usado como suporte de grande parte das situações apresentadas e servir de referência para o dimensionamento dos diversos parâmetros de QoS a aplicar aos diversos componentes do sistema.

O tráfego gerado pelos dispositivos a interligar interage com a aplicação de controlo através da rede de suporte e do sistema de agregação de tráfego. Deste modo, cada um destes elementos é responsável por uma quota parte da qualidade com que a informação é transferida entre as extremidades do sistema.

Por outro lado, se a área de cobertura tiver uma dimensão que justifique o recurso a uma rede pública, será necessário reduzir ao máximo o débito contratado sem com isso degradar a QoS.

4.2 Características funcionais de desempenho

Quando os requisitos de QoS obrigam a garantir a entrega da informação com atrasos controlados, a rede terá de garantir um atraso máximo de forma ao resto do sistema poder quantificar os seus limites de funcionamento. Assim, o atraso total será composto por duas parcelas:

$$\delta = \delta_R + \delta_A \quad (4\text{-}1)$$

em que δ_R representa o atraso introduzido pela rede e δ_A o atraso introduzido pelo sistema de agregação de tráfego. O valor da primeira parcela poderá ser garantido através da negociação dos valores dos parâmetros de tráfego e de QoS das ligações a estabelecer com a rede, enquanto que a segunda dependerá de aspectos relacionados com o grau de multiplexagem estatística das fontes e o algoritmo de escalonamento dos fluxos.

No caso em que há interactividade, ou seja, em que a informação processada pela Aplicação de controlo desencadeia uma acção em sentido inverso, é necessário adicionar o atraso da informação no sentido da Aplicação de controlo para o dispositivo final. Neste caso o atraso será dado por:

$$\delta = 2.\delta_R + \delta_A + \delta_D \quad (4\text{-}2)$$

O valor δ_D corresponde ao atraso na desmultiplexagem dos canais no sistema de agregação de tráfego e é praticamente desprezável face às outras parcelas. Nos casos em que o atraso na rede não é igual nos dois sentidos a parcela $2.\delta_R$ terá de ser corrigida.

Na secção 4.2.1 será apresentado um estudo acerca dos atrasos de transmissão de algumas tecnologias de redes públicas e privadas. Na secção 4.2.2 são apresentados alguns parâmetros relacionados com as tecnologias apresentadas no capítulo 3, tais como largura de banda, área de cobertura, capacidade de endereçamento, débitos e atrasos suportados. Finalmente, na secção 4.2.3 são fundamentadas as opções de escolha da tecnologia de rede mais adequada, em função dos recursos disponíveis e dos requisitos de QoS, de modo a ser possível o dimensionamento dos vários componentes do sistema.

4.2.1 Atrasos de transmissão

O tempo necessário para a transmissão da informação, ao longo dos vários segmentos digitais da rede, é resultante de duas componentes: o atraso no processamento da informação nos

equipamentos (e.g. empacotamento, atrasos em filas de espera) e o atraso de propagação [ITU00]. Deverá ser dada especial atenção aos casos em que, nos equipamentos de telecomunicações, é efectuado processamento de sinal, empacotamento e desempacotamento de informação e codificação / descodificação de informação.

O valor de 400ms tem sido considerado como limite de referência para efeitos de planeamento, já que a transmissão de informação de voz era o factor que impunha as restrições mais apertadas em termos de desempenho global.

O atraso de transmissão é um parâmetro muito importante para qualquer aplicação cujo desempenho global é dependente da interactividade entre terminais ou utilizadores. Aplicações como a voz, a vídeo-telefonia ou a transmissão de dados podem envolver interacções com o utilizador ou com terminais cuja sensibilidade ao atraso pode variar substancialmente. Uma vez que nem a rede nem os operadores de telecomunicações podem alterar as características relacionadas com o atraso de propagação ou os meios de transmissão entre operadores, em resposta aos diferentes requisitos de utilizadores e aplicações, algumas tarefas que exijam uma maior interactividade poderão sofrer alguma degradação no seu desempenho mesmo para valores do atraso da ordem dos 100ms. Deste modo, o atraso de transmissão deverá ser "consumido" com precaução e só apenas quando este traz benefícios ao desempenho do serviço. Isto aplica-se especialmente no caso dos atrasos introduzidos devido ao processamento de sinal.

O serviço de voz é bastante sensível ao atraso e menos sensível a variações desse atraso (*jitter*). É muito importante garantir que o atraso extremo-a-extremo seja mantido entre valores bem definidos de modo a garantir uma comunicação interactiva com desempenho adequado. O atraso pode produzir dois tipos de efeito no desempenho de uma comunicação [Iye97]: pode interferir na qualidade de uma comunicação de voz na ausência de eco, enquanto que na sua presença, o aumento do atraso, provoca um aumento do seu efeito. Quando o atraso ultrapassa os 30ms, é necessário introduzir circuitos canceladores de eco. Com circuitos canceladores de eco, os atrasos na rede podem ser tolerados até valores da ordem dos 150ms sem degradação da QoS.

A Tabela 4-1 apresenta os limites temporais considerados aceitáveis, no caso da transmissão unidireccional com controlo de eco adequado, de acordo com a recomendação G.114 do ITU-T [ITU00].

Tabela 4-1: Limites temporais para a transmissão unidireccional de serviços de voz, retirados da recomendação G.114 do ITU-T.

Atraso	Aceitabilidade
0 - 150 ms	Aceitável na maior parte das aplicações
150 - 400 ms	Aceitável quando o impacto na aplicação o permite
> 400 ms	Inaceitável

Nem sempre é possível prever os atrasos associados a algumas aplicações ou configurações de rede o que pode conduzir, em alguns casos, a que os tempos de processamento combinados com os tempos de propagação conduzam a um tempo de transmissão total superior a 400ms.

Na Tabela 4-2 são apresentados alguns valores retirados da Tabela A.1 da Recomendação G.114 do ITU-T.

Tabela 4-2: Alguns valores retirados da Tabela A.1 da Recomendação G.114 do ITU-T.

Sistema / Meio de Transmissão	Contribuição para o tempo total de transmissão
Cabo coaxial terrestre ou sistema transmissão rádio: FDM e transmissão digital	4μs/km
Cabo de fibra óptica submarino (transmissão digital)	5μs/km
Cabo coaxial submarino	6μs/km

Por exemplo, a contribuição para o tempo total de transmissão de um sistema por cabo coaxial terrestre entre duas localidades afastadas de 600km é de 2,4ms.

Os sinais propagam-se nos meios de transmissão com uma velocidade (**v**) finita. Numa transmissão por rádio a velocidade de propagação é próxima da velocidade da luz (300.000km/s). Quando se utilizam cabos as velocidades de propagação são inferiores. A fibra óptica monomodo permite atingir 70% da velocidade da luz, ou seja, cerca de 210.000km/s. A velocidade de propagação nos cabos de cobre situa-se entre 40% a 60% da velocidade da luz (i.e. entre 120.000km/s a 180.000km/s).

Ao percorrer uma distancia **d** o atraso de propagação será de:

$$T_p = d / v \qquad (4\text{-}3)$$

Esta expressão é válida para dois nós que se encontrem directamente ligados ao mesmo meio físico, o que na prática nem sempre acontece. Quando o sinal passa por diversos meios físicos será necessário contabilizar os atrasos em cada um deles. Além dos atrasos de propagação nos meios físicos têm de ser também considerados os atrasos em outros equipamentos activos da rede (e.g. *bridges*, comutadores, *routers*).

O tempo de transmissão de um pacote T_t depende do seu comprimento (**L** em bits) e da taxa de transmissão nominal (**R** em bit/s):

$$T_t = L / R \qquad (4\text{-}4)$$

Define-se atraso de propagação normalizado como sendo a razão entre o atraso de propagação e o tempo de transmissão:

$$\mathbf{a} = T_p / T_t \qquad (4\text{-}5)$$

As LANs (LAN, *Local Area Network*) são um exemplo típico da importância deste parâmetro sendo neste caso obrigatório que:

$$\mathbf{a} < 0{,}5 \qquad (4\text{-}6)$$

Numa LAN os tempos de atraso são pequenos porque as distâncias são curtas. No entanto, é preciso notar que é nas LANs que as taxas de transmissão tendem a ser mais elevadas; logo os valores do atraso de propagação normalizado poderão não respeitar a equação 4-6. Considere-se o seguinte exemplo:

- Rede Ethernet (IEEE 802.3),
- cabo de cobre com velocidade de propagação de 150.000km/s,
- tamanho mínimo de trama: 64 octetos (imposição CSMA/CD),
- valor máximo de **a**: 0,5 (imposição CSMA/CD).

Uma rede Ethernet a 10Mbit/s permite um comprimento máximo de 2500m (10base5). Para calcular o valor de **a** tem-se que:

$$T_p = 2{,}5 / 150.000 = 16{,}66\mu s \qquad (4\text{-}7)$$

Sendo o débito nominal de 10Mbit/s, e se se considerar um pacote de tamanho mínimo de 64octetos (512bit), obtém-se:

$$T_t = 512 / 10.000.000 = 51{,}2\mu s \qquad (4\text{-}8)$$

O valor obtido para **a** é de cerca de 0,33 o que representa uma folga razoável relativamente ao valor máximo de 0,5. Esta folga justifica-se pela necessidade de entrar em consideração com atrasos na sincronização e atrasos na passagem em dispositivos repetidores.

Supondo agora uma implementação Fast Ethernet a 100Mbit/s:

$$T_t = 512 / 100.000.000 = 5{,}12\mu s \qquad (4\text{-}9)$$

O valor obtido para **a** é agora 3,3 não suportado pelo CSMA/CD. Esta é uma das razões pela qual as redes Fast Ethernet têm um comprimento máximo de cerca de 210m. Considerando 210m, obtém-se:

$$T_p = 0{,}21 / 150.000 = 1{,}4\mu s \qquad (4\text{-}10)$$

resultando um valor de **a** de 0,27.

No caso de uma rede ATM (ATM, *Asynchronous Transfer Mode*), o atraso pode ser provocado pelos seguintes factores:

- **Tempo de Empacotamento (ou tempo de construção de uma célula):**

Tempo necessário ao preenchimento completo de uma célula antes de ser transmitida. Por exemplo, no caso de canais de voz de 64kbit/s, codificados em PCM (PCM, *Pulse Code Modulation*), o tempo necessário ao preenchimento do campo de informação de uma célula ATM (48 octetos) é de 6ms.

- **Tempo de desempacotamento (*buffering delay*)**

Por vezes, devido aos atrasos ao longo dos vários nós da rede, algumas células chegam ao destino para lá de um tempo determinado (*deadline*). Quando isso acontece a subcamada SAR (SAR, *Segmentation And Reassembling*) da camada AAL (AAL, *ATM Adaptation Layer*) tem de lidar com a falta de informação para processar o que resulta em falhas na conversação, no caso de serviços de voz. Como forma de evitar este fenómeno, a subcamada SAR pode implementar um mecanismo que consiste em acumular informação numa memória antes de iniciar o processo de reconstrução das amostras de voz. Para evitar a ocorrência do esvaziamento dessa memória, o seu tamanho poderá ser tal que provoque um atraso superior ao adequado. Neste caso o tamanho da memória tem implicações directas no atraso o que implica um controlo do parâmetro CDV (CDV, *Cell Delay Variation*) numa rede ATM de forma a reduzir ao máximo este factor.

- **Tempo de codificação**

Tempo gasto no processamento de algoritmos de compressão na codificação de um sinal analógico em formato digital.

A qualidade de um serviço de vídeo é obtida através de parâmetros relacionados com a taxa de tramas, resolução / tamanho da imagem, algoritmo de compressão e o método de codificação [Lap95]. As medidas principais de desempenho na transmissão deste serviço são:

- Latência: atraso verificado entre a fonte de vídeo e o dispositivo de visualização final,
- *Jitter*: variabilidade do parâmetro anterior entre transmissões sucessivas,
- Largura de Banda: recursos de rede necessários ao suporte da transmissão.

Os limites fixados para estes parâmetros variam conforme a aplicação. Por exemplo, a Latência é um parâmetro importante no caso da transmissão em tempo real de aplicações de vídeo, uma vez que atrasos superiores a 300ms podem ser facilmente perceptíveis durante comunicações interactivas. No entanto, em aplicações de *streaming* o *Jitter* é o principal problema.

- **Variação do atraso entre pacotes - *Packet Delay Variation* (PDV)**

A variação do atraso entre pacotes – PDV (PDV, *Packet Delay Variation*), numa rede ATM quando se usa o protocolo AAL-2, é medida entre a submissão de um pacote CPS na unidade de interfuncionamento – IWF (IWF, *Interworking Function*) e a recepção desse mesmo pacote pela sua semelhante na recepção. As causas da variação do PDV são:

- Disciplina de escalonamento da informação proveniente das fontes de entrada,
- Relógio de uso combinado da camada AAL-2 - Timer_CU,
- Filas de espera usadas pelas camadas AAL e ATM, respectivamente em concentradores ou dispositivos de controlo de tráfego,
- Variação do atraso entre células numa rede - CDV.

De acordo com [ATM99a], uma IWF deverá ter a capacidade de acomodar um valor máximo de PDV igual a 20ms, no transporte de pacotes através de uma ligação AAL-2 (incluindo o efeito do CDV). No caso de a ligação não ter sido estabelecida através de sinalização ou através de um outro acordo extremo-a-extremo, o mesmo valor de 20ms deverá ser usado como valor máximo por omissão.

4.2.2 Capacidades de transmissão e parâmetros de QoS das tecnologias estudadas

A escolha da tecnologia de suporte de aplicações de controlo terá de ser baseada em critérios objectivos, baseados na análise dos diversos parâmetros de QoS, que permitam avaliar quantitativamente as diversas opções em causa. Apresentando diferentes capacidades e características, as tecnologias de comunicação introduzidas no capítulo 3, merecem uma breve analise comparativa.

Na Tabela 4-3 são apresentados alguns valores que permitem comparar as capacidades de transmissão e alguns parâmetros de QoS, suportados pelas Redes de Área Local, Barramentos de Campo e pela rede pública digital, através da tecnologia ATM.

Tabela 4-3: Capacidades de transmissão e parâmetros de QoS, suportados pelas Redes de Área Local, Barramentos de Campo e pela rede pública digital através da tecnologia ATM.

Tecnologias		Débito Binário	Atraso	Capacidade de endereçamento	Cobertura
IEEE 802.3	Ethernet	< 10Mbit/s	< 200µs	> 16 X 10^6	1500m (Cabo) 25km (Fibra óptica)
	Fast Ethernet	< 100Mbit/s	< 120µs	> 16 X 10^6	210m (Cabo) 20km (Fibra óptica)
	Gigabit Ethernet	< 1Gbit/s	< 30µs	> 16 X 10^6	25m (Cabo) 5km (Fibra óptica)
Barramentos de Campo	CAN	< 1Mbit/s (40m) < 50kbit/s (1km)	1ms	< 2048	1km
	PROFIBUS	< 500kbit/s	1ms	127	4,8km
	P-NET	< 300Trans/s (2)	1ms	300	1,2km
	World-FIP	< 2,5 Mbit/s	1ms	60 nós (3)	1km
ATM	PDH	< 139 Mbit/s	variável (1)	> 16 X 10^6	ilimitada
	SDH	> 155 Mbit/s	variável (1)	> 16 X 10^6	ilimitada

(1) Variável com a distância
(2) Transacções por segundo (na prática corresponde a um valor de 76,8kbit/s [Tov99])
(3) Nós por repetidor

Através da observação da Tabela 4-3, é possível verificar a grande capacidade de transmissão e de endereçamento bem como a área de cobertura propiciadas pela tecnologia ATM relativamente aos Barramentos de Campo.

Estas características permitirão superar as limitações dos Barramentos de Campo, sobretudo nas aplicações de aquisição de dados e de controlo remoto que não exijam grandes restrições relativamente aos atrasos.

Em relação às LANs, o ATM tem a vantagem de permitir áreas de cobertura superiores e maior flexibilidade no endereçamento dos dispositivos associados às aplicações de controlo. Com efeito, apesar de na Tabela 4-3 as capacidades de endereçamento serem idênticas, no caso das redes IEEE 802.3 o endereçamento é feito através do endereço (*MAC Address*) da respectiva carta de rede. Este endereço, sendo único, tem significado físico e universal. Pelo contrário, no caso das redes ATM o endereçamento é feito através de um mecanismo, baseado em caminhos e canais virtuais (VPI/VCI), que não tendo significado físico e tendo validade apenas a nível local, podem ser reutilizados, o que conduz a uma muito maior flexibilidade na gestão dessa capacidade de endereçamento.

Ao contrário das LANs e dos Barramentos de Campo, que podem apresentar tempos de transmissão reduzidos, os atrasos extremo-a-extremo esperados nas redes públicas de telecomunicações, variam em função da distância entre os terminais interligados. No entanto, esta aparente vantagem, relativamente ao ATM, resultante da área de cobertura suportada por aquelas tecnologias ser limitada, pode ser irrelevante para a grande maioria das aplicações.

4.2.3 Escolha da tecnologia de rede

Como foi referido anteriormente, o tráfego produzido pelos dispositivos (e.g. sensores, actuadores) é de muito baixo débito o que pode conduzir a situações de baixa eficiência de transmissão na rede de comunicação. Por outro lado, alguns destes dispositivos requerem a entrega da informação com atrasos controlados, o que exige da rede a capacidade de garantir a transmissão da informação com uma determinada QoS definida no estabelecimento da ligação.

Os valores apresentados na Tabela 4-3 permitem concluir que, usando a tecnologia ATM, é possível resolver algumas limitações, impostas pelos Barramentos de Campo, a determinados requisitos de Aplicações de controlo, nomeadamente ao nível da capacidade de endereçamento, débito binário e área coberta.

Em relação às LANs, o ATM permite também uma muito maior flexibilidade, quer em termos de endereçamento, quer ao nível da garantia de QoS negociada para a ligação, para além de garantir uma maior área coberta.

A tecnologia ATM, através da sua camada de Adaptação AAL, permite implementar uma estrutura de multiplexagem eficiente para agregar o tráfego dos fluxos de baixo débito garantindo, por um lado, a identificação de cada dispositivo e, por outro, a definição de diferentes níveis de QoS em função da especificidade do serviço a transportar.

Como a tecnologia ATM não especifica o meio físico de transmissão, o transporte de células ATM poderá ser efectuado por um qualquer sistema que garanta a QoS necessária da ligação, entre a Aplicação de controlo e os dispositivos interligados.

Deste modo, ao seleccionar o ATM como suporte da infra-estrutura de comunicação do sistema de adaptação de tráfego de baixo débito, será possível garantir, à partida, um conjunto de vantagens enumeradas a seguir:

- Elevada capacidade de endereçamento de dispositivos associados à Aplicação de controlo,
- Estrutura de multiplexagem flexível e eficiente para o transporte da informação dos diversos serviços,
- Garantia de QoS da ligação estabelecida.

Nas secções seguintes será apresentada a solução para o problema, tendo como base a tecnologia ATM para o suporte da infra-estrutura de comunicação do sistema proposto.

4.3 Solução do problema

A grande quantidade de sensores e / ou actuadores que poderão integrar alguns sistemas de aquisição de dados e controlo obriga à definição de uma arquitectura que suporte a sua interligação, maximize a eficiência de transmissão da rede e garanta a QoS requerida pelos serviços a suportar. Por outro lado, é desejável do ponto de vista económico que os sistemas de suporte destas aplicações possam integrar outros serviços de telecomunicações. Estes quatro requisitos apontam para a resolução de quatro problemas fundamentais:

- Capacidade de endereçamento para identificar um elevado número de dispositivos,
- Estrutura da agregação e multiplexagem, para suportar aplicações em áreas de grande dispersão geográfica,
- Algoritmos de escalonamento, para garantir a satisfação da QoS associada a cada serviço,
- Integração de outros serviços para permitir utilização de recursos eventualmente existentes, bem como a expansão de funcionalidades do sistema.

O primeiro, segundo e o quarto problemas são resolvidos directamente através do uso da tecnologia ATM. O problema fica resolvido uma vez que o endereçamento dos diferentes terminais ou fontes de tráfego pode ser efectuado através de um mecanismo baseado nos identificadores de caminho e de canal virtual (VPI/VCI), da camada ATM, bem como pelos identificadores dos canais eventualmente multiplexados pela camada AAL.

A resolução do segundo problema consegue-se através da escolha do protocolo AAL mais adequado à estrutura de multiplexagem pretendida. Existem já inúmeras normas definidas para o suporte de várias aplicações e serviços sobre ATM, principalmente para a adaptação de tráfego de débito constante, como, por exemplo, emulação de circuitos [Cab95], em que se utiliza o AAL-1 [ITU96b], e para emulação de outras redes e protocolos de transferência de dados, em que se utiliza sobretudo o AAL-5 [ITU96d]. No entanto, ainda estão por definir formas de interligar eficientemente alguns sistemas de transferência de dados que foram pensados para operarem isolados e, simultaneamente, adaptar os respectivos serviços de muito baixo débito e com requisitos temporais exigentes, tais como o tráfego gerado em sistemas de controlo distribuído, ou por sistemas de aquisição de dados, onde poderão ser usados protocolos do tipo AAL-2 [ITU97b] ou AAL-3/4 [ITU96c].

A adaptação ineficiente de serviços de muito baixo débito em redes ATM relaciona-se com o atraso no preenchimento dos pacotes ATM (células ATM) que pode degradar substancialmente a Qualidade de Serviço (atraso). A resolução deste problema passa pela criação de uma estrutura modular que permita multiplexar vários serviços de muito baixo débito em células ATM, reduzindo o atraso de empacotamento e aumentando a eficiência da rede.

Finalmente, para resolver o terceiro problema, é necessário estudar algoritmos de escalonamento temporal de forma a cumprir os requisitos, por vezes exigentes, de alguns tipos de aplicações industriais.

4.3.1 Sistema proposto

A Figura 4-4 apresenta o diagrama de blocos para o sistema de adaptação de tráfego de baixo débito em aplicações de controlo. Sem perda de generalidade, a topologia lógica do sistema de concentração é do tipo N para 1, uma vez que é suposto que uma Aplicação de controlo, destinada a recolher informação de vários pontos, esteja situada num único local físico. No entanto, os módulos de adaptação e de concentração poderão ter mais do que uma porta de saída, para interligação a outros módulos constituintes do sistema, por ligações de nível físico, que asseguram o transporte bidireccional de células ATM.
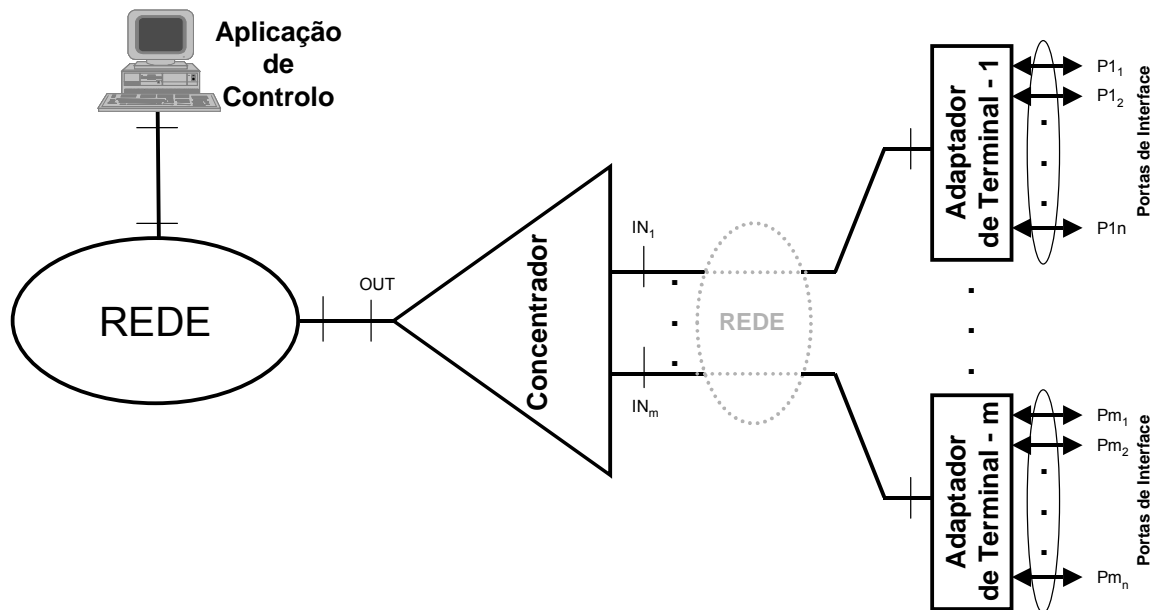
Figura 4-4: Diagrama de blocos do sistema de adaptação de tráfego de baixo débito em aplicações de controlo.

O sistema proposto consiste numa estrutura modular, suportada numa rede, por dois blocos fundamentais:

- Adaptador de terminal,
- Concentrador.

O Adaptador de terminal é o módulo que permite a interligação dos dispositivos de baixo débito com a rede, efectuando a multiplexagem e desmultiplexagem das várias fontes de tráfego, tendo em conta os requisitos de atraso (QoS) de cada uma.

O Concentrador permite não só agregar o tráfego proveniente dos vários Adaptadores de terminal como também efectuar uma re-multiplexagem de todo o tráfego. O seu objectivo principal é o de aumentar a taxa de preenchimento das células ATM e assim aumentar a eficiência de transmissão da rede. De referir que este módulo não é necessário, numa estrutura com apenas um Adaptador de terminal. Neste caso, a Aplicação de controlo e o Adaptador de terminal têm apenas a rede como elemento de interligação.

A Aplicação de controlo é o módulo que permite efectuar a gestão de todos os processos relacionados com o fenómeno a controlar. É implementada numa estação de trabalho onde um conjunto de programas efectuam um conjunto de tarefas específicas destinadas ao controlo da ligação, ao processamento de dados relacionados com a aplicação em causa e ao interface com o operador. Em função da especificidade da aplicação de controlo será necessário

desenvolver funções particulares, necessárias à resolução dos requisitos de cada aplicação. No entanto, existem um conjunto de funções comuns, independentes da aplicação, que terão sempre de existir. Essas funções devem permitir um elevado nível de abstracção no desenvolvimento das funções relacionadas com uma dada aplicação específica.

A interligação entre os diversos Adaptadores de terminal e o Concentrador, ou entre o Concentrador e a rede poderá ser efectuada usando algumas das tecnologias descritas no capítulo 2. No entanto, uma vez que se assume que essas ligações fornecem um canal transparente, não é dada relevância, nesta tese, ao estudo desse problema.

A especificação detalhada do sistema proposto, assim como dos seus módulos constituintes será apresentada no capítulo 5.

4.3.2 Escalonamento de tráfego

Para disciplinar a concentração dos fluxos de informação, provenientes das diferentes fontes de tráfego que concorrem pelo acesso às capacidades de transmissão disponíveis, será necessário desenvolver algoritmos de escalonamento temporal, de modo a determinar a ordem em que esses fluxos são servidos e assim satisfazer os diferentes requisitos de QoS de cada fonte de informação.

O algoritmo de escalonamento mais simples consiste em colocar os pacotes de informação dos diferentes fluxos numa mesma estrutura de memória do tipo FIFO (FIFO, *First In First Out*) pela ordem de chegada, sendo servidos pela mesma ordem. Este algoritmo, denominado por FCFS (FCFS, *First Come First Served*), embora simples de implementar não garante equidade no escalonamento, protecção entre os diversos fluxos de informação e garantia de QoS.

De modo a superar as limitações do algoritmo anterior, foram propostos na literatura [Kes97] e usados outro tipo de algoritmos para efectuar o escalonamento de tráfego assíncrono baseados, na sua maioria, no algoritmo ideal denominado por GPS (GPS, *Generalized Processor Sharing*), também conhecido pela designação FFQ (FFQ, *Fluid Fair Queuing*). Em termos lógicos, este algoritmo atribui uma fila de espera a cada fluxo de informação, visitando cada uma sequencialmente e servindo uma quantidade infinitesimal de informação de cada fila. Deste modo, num intervalo de tempo finito, cada fila é visitada pelo menos uma vez. A cada fluxo pode ser associado um peso diferente, permitindo que a quantidade de dados servida de um dado fluxo seja proporcional ao respectivo peso.

Este algoritmo pode ser implementado, duma forma simples, através de uma mecanismo de rotação (*round-robin*), em que as diversas filas de espera são servidas sequencialmente e da mesma forma que no GPS. No entanto, este mecanismo, serve um pacote de informação de cada vez em vez de uma quantidade infinitesimal. Este algoritmo constitui uma boa aproximação do GPS, nos casos em que os fluxos têm o mesmo peso e os pacotes possuem o mesmo comprimento. O algoritmo WRR (WRR, *Weighted Round-Robin*) é uma variação do mecanismo de rotação em que os fluxos são servidos na proporção dos seus pesos [Kes97].

O WFQ (WFQ, *Weighted Fair Queuing*) é um algoritmo que implementa melhor os critérios definidos pelo GPS, nomeadamente quando os pacotes são de tamanho variável [Dem89]. No entanto, este algoritmo apresenta uma maior complexidade de implementação que o WRR. O algoritmo WFQ atribui a cada pacote um identificador correspondente ao instante em que cada pacote deveria ser servido pelo algoritmo GPS, e serve cada pacote pela ordem dos seus identificadores. O algoritmo WFQ parece, à partida, ser adequado ao tráfego de tempo-real. No entanto, a largura de banda atribuída varia inversamente com o atraso pretendido para a ligação, tornando este algoritmo pouco eficiente quando se pretendem atrasos baixos e taxas de ocupação de banda elevadas [Par94].

Para o escalonamento de tráfego de tempo-real existem descritos outros algoritmos tais como o EDD (EDD, *Earliest Due Date*), também conhecido como EDF (EDF, *Earliest Deadline First*), que consiste em atribuir a cada pacote um prazo de validade (*deadline*), usado pelo escalonador para definir a ordem em que os pacotes deverão ser servidos. Neste algoritmo, um pacote ao qual é atribuído um prazo mais próximo do instante de chegada sofre um atraso menor na fila de espera do que outro ao qual tenha sido atribuído um prazo mais distante. Dependendo da carga, pode não ser possível servir todos os pacotes antes de se atingir os respectivos prazos que lhe foram atribuídos.

Algoritmos de escalonamento

Como foi referido anteriormente, será necessário implementar mecanismos de escalonamento de tráfego de modo a permitir garantir que os fluxos associados a serviços que imponham requisitos de atraso na ligação possam ser suportados pelo sistema com a QoS pretendida.

Os algoritmos desenvolvidos para o Adaptador de terminal e para o Concentrador serão objecto de estudo detalhado no capítulo 6, onde serão especificados detalhadamente e efectuada a sua análise de desempenho. Nesta secção, apenas serão abordados os aspectos mais gerais, enquadrados nas classes de tráfego e outros conceitos apresentados anteriormente.

- **Algoritmo de escalonamento do Adaptador de terminal**

O algoritmo desenvolvido para o Adaptador de terminal caracteriza-se por implementar um mecanismo de prioridade híbrido baseado no algoritmo do tipo EDF e no critério de dar prioridade à fila que, num dado instante, tiver o tamanho maior. Cada fluxo de informação é introduzido numa memória do tipo FIFO, onde lhe é atribuída uma classe de tráfego em função dos requisitos de QoS a suportar pelo sistema. No caso da classe de tráfego ser do tipo AM é também introduzido, através do módulo de configuração, um parâmetro que especifica o atraso máximo (AM) que a informação deverá sofrer no Adaptador de terminal.

Em função dos parâmetros anteriores, é calculado o instante de atendimento (*deadline*) de cada fila do tipo AM, baseado no parâmetro AM (Atraso Máximo). Enquanto não for atingida a *deadline* das filas AM, o algoritmo opta por atender a maior das filas de classe AM ou D. Caso não exista informação destas classes nas filas, atende as filas de classe EF, de forma sequencial, da maior para a menor

- **Algoritmo de escalonamento do Concentrador**

O algoritmo de escalonamento do Concentrador é bastante mais simples que o anterior, uma vez que a informação do parâmetro de atraso máximo (AM), dos fluxos de classe AM, só é usada pelo Adaptador de terminal. Neste caso não é necessário calcular as *deadlines* associadas aos fluxos de classe AM.

Os pacotes que vão sendo recebidos, à entrada do Concentrador, são colocados em 3 filas específicas, em função da classe de tráfego que lhes está associada. O escalonador atende as filas pela seguinte ordem: AM, D e EM. Enquanto houver pacotes numa dada fila, não são atendidos os pacotes da fila menos prioritária.

Devido ao efeito de concentração, poderá ocorrer o fenómeno de *overflow* no FIFO de pacotes da classe EM, uma vez que estes pacotes têm a prioridade mínima de atendimento. Nestas situações, o algoritmo limita-se apenas a rejeitar os pacotes que excedam a capacidade do FIFO.

Síntese

Neste capítulo foi discutido o problema da adaptação do tráfego de baixo débito em aplicações de controlo, em termos de cenários de aplicação, tipos de dispositivos a interligar, referenciais de QoS suportados e arquitectura de referência. Foi

caracterizado funcionalmente o desempenho de várias tecnologias de rede, em função dos atrasos e das capacidades de transmissão. Foi igualmente apresentada uma solução concreta para o problema, baseada na tecnologia ATM, suportada por Adaptadores de terminal e Concentradores que incorporam funções de escalonamento de tráfego.

O Modo de Transferência Assíncrono ATM permite multiplexar um número muito elevado de fontes de tráfego, garantindo a QoS negociada no estabelecimento ou durante a fase activa das ligações.

A capacidade de endereçamento, oferecida pela camada ATM, permite identificar um número de elementos terminais, como sensores ou actuadores, incomparavelmente maior do que o suportado pelos actuais sistemas de aquisição de dados e controlo, geralmente utilizados em ambientes industriais. A capacidade da rede ATM para suportar este tipo de tráfego permitirá, além da possibilidade de integrar diferentes tipos de sistemas e equipamentos, o aparecimento de novas aplicações, assim como a inclusão de novas funcionalidades noutras aplicações que apresentam, actualmente, desempenhos significativamente limitados. Esta capacidade de multiplexagem pode mesmo ser expandida nomeadamente pelo protocolo da camada de adaptação AAL-2.

Além disso, quando necessário, a utilização das redes públicas de telecomunicações, para interligar remotamente unidades sensores e actuadoras, permitirá alargar a área de cobertura dos actuais sistemas de aquisição de dados e controlo. Ao oferecer maiores capacidades de transmissão e atrasos controláveis, as redes ATM permitem igualmente integrar tráfego de fluxos de baixo débito com os gerados por outro tipo de serviços.

Por outro lado, qualquer sistema de transmissão, com capacidade de transportar de uma forma transparente células ATM, podem servir de suporte da infra-estrutura de rede da solução proposta.

5

Especificação do sistema proposto

No capítulo anterior foi apresentada uma solução que permite superar algumas das limitações dos principais sistemas que constituem as redes industriais. No entanto, para atingir os objectivos propostos, torna-se necessário especificar, em concreto, a arquitectura geral do sistema, composta por um ou vários Adaptadores de terminal e um Concentrador ligados, através de uma Rede de comunicação, a uma Aplicação de controlo.

A Rede de comunicação poderá ser uma rede ATM (ATM, *Asynchronous Transfer Mode*) ou, então, terá de ter a capacidade de transportar, de uma forma transparente, células ATM. Como foi referido no capítulo 3, a tecnologia ATM foi desenvolvida baseada no pressuposto de ser independente do sistema de transmissão e do meio de transmissão utilizados e, como tal, se adaptar a qualquer tecnologia.

O Adaptador de terminal e o Concentrador são módulos que permitem optimizar a ocupação da largura de banda disponível para a agregação dos fluxos de baixo débito proveniente dos serviços a suportar. Essa agregação poderá ser integrada com outro tipo de tráfego, proveniente de outro tipo de serviços que permitirá optimizar, ainda mais, a eficiência de transmissão. Estes módulos permitem também garantir o transporte de serviços com requisitos de atraso apertados através do dimensionamento de algoritmos de escalonamento apropriados.

Assim, neste capítulo são apresentadas as especificações funcionais do Adaptador de terminal e do Concentrador, assim como os requisitos fundamentais para o desenvolvimento da Aplicação de controlo.

5.1 Arquitectura geral do sistema proposto

No capítulo 4 foram apresentados os pressupostos que deram origem à especificação desta configuração e foi introduzida a sua arquitectura. Como foi ilustrado na Figura 4-4, o sistema proposto consiste numa estrutura modular suportada por dois blocos fundamentais:

- Adaptador de terminal,
- Concentrador.

O Adaptador de terminal permite a interligação de todos os dispositivos envolvidos na aplicação de controlo à rede. Assim, cada porta do Adaptador de terminal poderá suportar a ligação de um dispositivo único (e.g. sensor, actuador, sistema de aquisição de dados) ou de um dispositivo que poderá já agregar tráfego (e.g. painel de actuadores, bateria de sensores integrados).

Em função dos requisitos de QoS (QoS, *Quality of Service*) de cada serviço (i.e. porta de interface do Adaptador de terminal) será efectuada a agregação do tráfego de forma a optimizar a ocupação da largura de banda sem comprometer a garantia do atraso especificado para cada serviço.

A agregação de tráfego (multiplexagem) será suportada através do uso dos pacotes CPS (CPS, *Convergence Packet Sublayer*) do protocolo AAL-2 (AAL-2, *ATM Adaptation Layer – Type 2*) e de um mecanismo de escalonamento de tráfego, baseado num Algoritmo especificado e analisado no capítulo 6.

O endereçamento das fontes de tráfego poderá ser efectuada directamente através do campo CID (CID, *Channel Identifier*) do cabeçalho dos pacotes CPS ou, no caso da capacidade fornecida por este não ser suficiente, recorrer ao mecanismo fornecido pela camada ATM, através dos canais virtuais (VCI, *Virtual Channel Identifier*) e dos caminhos virtuais (VPI, *Virtual Channel Identifier*). Apesar desta possibilidade, a especificação do Adaptador de terminal efectuada para o estudo da adaptação de tráfego de baixo débito em aplicações de controlo, apenas prevê o endereçamento baseado no campo CID, uma vez que a complexidade acrescida, pela introdução deste mecanismo, não afecta os pressupostos que estiveram na base do desenvolvimento dos algoritmos de escalonamento.

O Concentrador permite não só agregar o tráfego proveniente dos vários Adaptadores de terminal como também efectuar uma espécie de multiplexagem de segunda ordem. O seu objectivo principal é o de aumentar a eficiência de transmissão da rede e, ao mesmo tempo,

implementar um mecanismo de prioridade de forma a permitir escalonar tráfego com diferentes requisitos de atraso.

O Concentrador utiliza igualmente os pacotes CPS como estrutura elementar de multiplexagem. Deste modo, este módulo efectua o desencapsulamento dos pacotes recebidos de cada Adaptador de terminal e, em seguida, efectua um novo escalonamento de forma a produzir um fluxo único, em que os pacotes com requisitos de atraso mais apertados são atendidos com maior prioridade. O algoritmo de escalonamento desenvolvido para o Concentrador será igualmente especificado e analisado no capítulo 6.

De referir que este módulo não é necessário numa estrutura com apenas um Adaptador de terminal. Neste caso, a Aplicação de controlo e o Adaptador de terminal têm apenas a rede como elemento de interligação.

A Aplicação de controlo é o módulo que permite gerir o processo de comunicação entre todos os elementos integrantes do sistema de aquisição de dados e controlo. Consiste numa estação de trabalho, ligada à rede de comunicação, em que vários programas efectuam um conjunto de tarefas específicas. Toda a informação proveniente dos dispositivos interligados é recolhida e processada. Em função da especificidade da aplicação, poderá ser necessário enviar informação, em sentido inverso, para outros dispositivos igualmente ligados a Adaptadores de terminal. Embora exista um número elevado de situações possíveis para cenários deste tipo de aplicações, o que importa neste momento assegurar é a capacidade da solução proposta garantir a adequada transferência de informação, não apenas entre os elementos integrantes do sistema de aquisição de dados e controlo, mas também a de outros tipos de serviços, suportados numa rede de forma integrada e com garantia de QoS.

5.2 Adaptador de Terminal

No contexto da RDIS (RDIS, Rede Digital com Integração de Serviços), um Adaptador de terminal é um dispositivo que permite que equipamentos não RDIS possam operar nestas redes. Nos modelos propostos, a especificação do Adaptador de terminal pode ser simplificada, tendo em consideração apenas as funções necessárias para adaptar os fluxos de baixo débito às características da rede de comunicação, maximizando a eficiência da rede e garantindo a QoS (atraso) requerida pelo serviço. No entanto, terão igualmente de ser referidas as restantes funcionalidades de gestão e sinalização necessárias ao interfuncionamento com equipamentos normalizados.

O Adaptador de terminal pode ser considerado como um conjunto de máquinas de estado de emissão e recepção que funcionam duma forma independente. Na emissão é necessário multiplexar o tráfego proveniente de várias fontes (e.g. sensores), com diversos requisitos temporais, num único fluxo, garantindo por um lado a QoS exigida por cada terminal e, por outro, maximizando a eficiência de transmissão. Na recepção é necessário efectuar a desmultiplexagem dos canais, suportados pelo fluxo de informação destinado aos actuadores integrantes do sistema a controlar.

A solução proposta para o Adaptador de terminal, sendo baseada na tecnologia ATM, para além de estabelecer a interface de rede com os sensores / actuadores, permite resolver os problemas de identificação destes dispositivos pela aplicação de controlo, através da identificação dos circuitos e dos trajectos virtuais (VCI/VPI), utilizados nessa interface, bem como com a estrutura de multiplexagem da camada de adaptação (CID / AAL2). A Figura 5-1 ilustra a estrutura funcional em camadas do Adaptador de terminal.
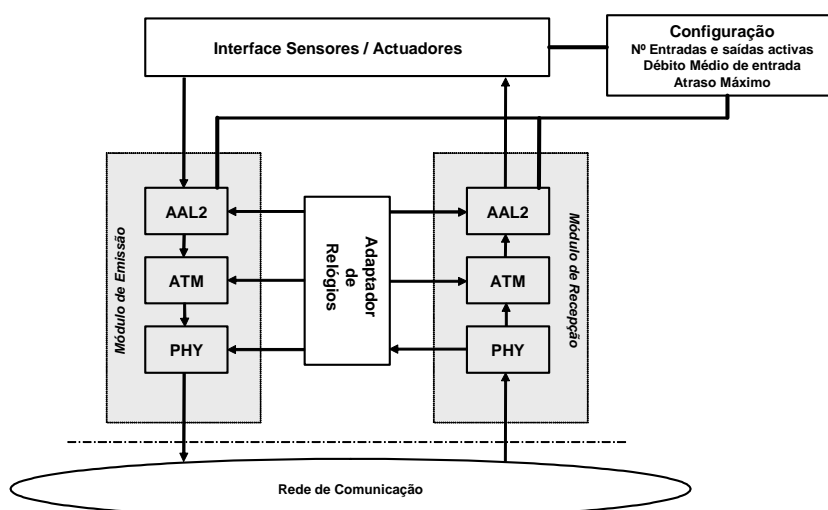
Figura 5-1: Estrutura Funcional do Adaptador de terminal.

- **Módulo de Configuração**

O módulo de configuração permite ao utilizador efectuar a definição das características de tráfego e de QoS dos dispositivos a ligar ao Adaptador de terminal. Os parâmetros de entrada são os seguintes:

- Número de canais de entrada e saída activos,
- Débito médio de entrada / saída,
- Atraso Máximo.

O primeiro indica, de todos os canais disponíveis, quantos vão estar activos. O segundo especifica qual o débito médio; no caso de o canal ser de débito constante, este valor é igual ao valor médio. Finalmente, o terceiro especifica o atraso máximo (quando requerido) de cada canal.

5.2.1 Módulo de Emissão

O módulo de emissão implementa as funções de multiplexagem necessárias à agregação dos diversos fluxos de entrada num único fluxo (ATM - SDU, *ATM - Service Data Unit*). O escalonamento dos fluxos de entrada é fundamental para se respeitarem os atrasos máximos e assim garantir a QoS requerida. Este escalonamento é matéria de discussão do capítulo 6, onde serão abordadas as questões do dimensionamento dos vários módulos funcionais do sistema.

As funções de multiplexagem usam como suporte os pacotes CPS do protocolo AAL-2. Deste modo, a subcamada SSCS (SSCS, *Service Specific Convergence Sublayer*) deste protocolo é suprimida. A Figura 5-2 ilustra o diagrama funcional do Módulo de Emissão do Adaptador de terminal.
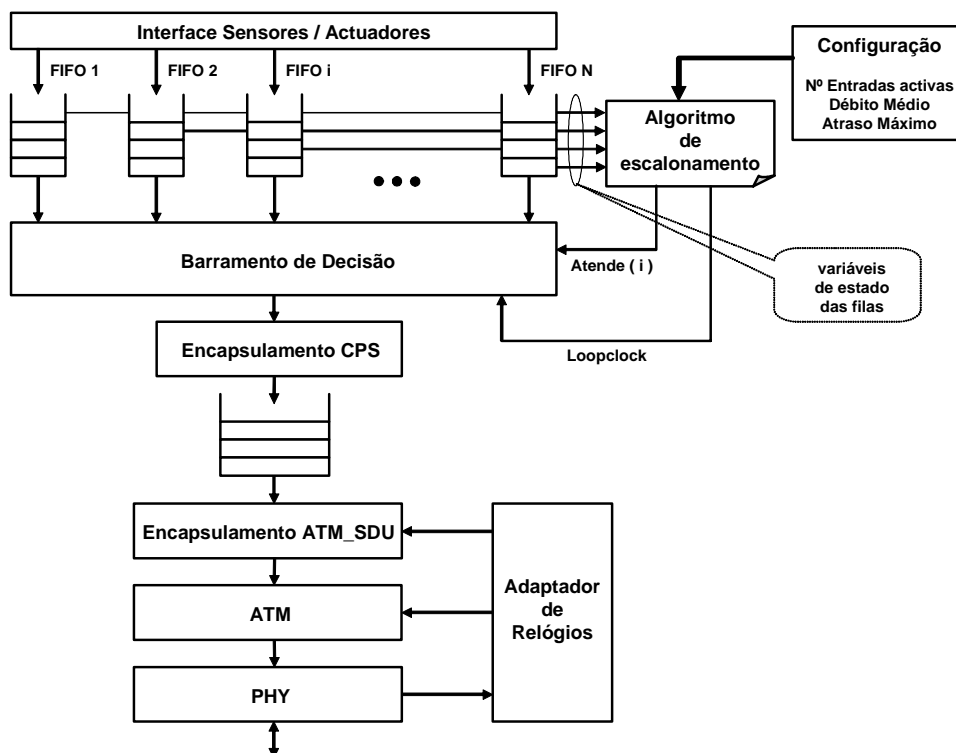
Figura 5-2: Estrutura Funcional do Adaptador de terminal (Módulo de Emissão).

- **Algoritmo de escalonamento**

Este é o módulo fundamental do Adaptador de terminal. As entradas são os parâmetros fornecidos pelo módulo de configuração e a indicação das variáveis de estado das filas de espera associadas a cada canal de entrada. Em função destes parâmetros, este módulo “decide” qual a fila (FIFO, *First In First Out*) a atender e a velocidade de atendimento (*LoopClock*). A descrição do Algoritmo de escalonamento, o seu funcionamento e os testes efectuados ao seu desempenho estão descritos com detalhe no capítulo 6 desta tese.

- **Encapsulamento CPS**

Este módulo efectua a construção dos pacotes CPS em função do FIFO atendido. Ao receber do Algoritmo de escalonamento a indicação de qual o FIFO a atender, é criado um pacote CPS com um comprimento igual ao número de octetos que estiver no FIFO. No caso de haver mais octetos no FIFO do que o comprimento máximo definido para os pacotes CPS, o pacote é construído com um comprimento igual a este valor. Os octetos restantes farão parte do pacote seguinte correspondente a este canal.

Os detalhes relacionados com o formato de dados deste protocolo foram já descritos na secção 3.3.1.3. No entanto, a Figura 5-3 mostra novamente, de uma outra forma, a estrutura de um pacote CPS.
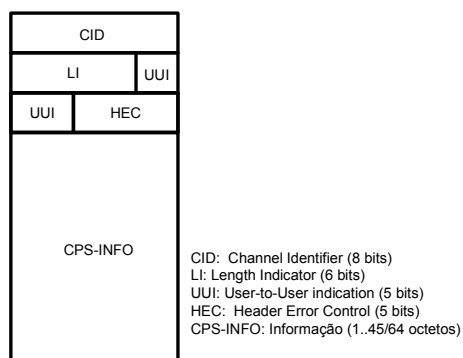
Figura 5-3: Estrutura de um pacote CPS.

O Campo CID identifica o canal utilizado. Os canais são numerados de 8 a 255, uma vez que a recomendação reserva os valores entre 0 e 7 para outras funções.

O campo LI indica o comprimento do campo de informação (CPS-INFO) em octetos. Para cada canal, o valor de LI indica quantos octetos foram lidos do FIFO da entrada correspondente. Este

valor pode variar, para cada canal, em função do número de octetos disponíveis no FIFO e em cada processo de leitura.

Como foi referido no capítulo 3, o campo UUI pode implementar duas funções: transportar informação específica, de forma transparente, através da subcamada CPS e distinguir entre uma entidade SSCS (caso os valores estejam entre 0 e 27) e a camada de gestão. No contexto deste trabalho foi usada a primeira opção, onde o campo UUI serve para endereçar o Adaptador de terminal e implementar um mecanismo de identificação da classe de tráfego, associada ao fluxo transportado pelo pacote CPS, de acordo com o especificado na secção 4.1.3. A Figura 5-4 ilustra este mecanismo.
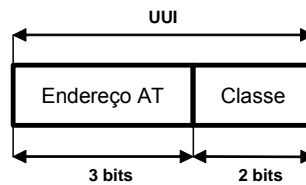
Figura 5-4: Estrutura do campo UUI dos pacotes CPS.

Os primeiros 3 bits permitem endereçar 8 Adaptadores de terminal, enquanto que os dois últimos identificam a classe de tráfego associada ao fluxo transportado pelo pacote CPS. No caso da aplicação necessitar de uma estrutura com mais Adaptadores de terminal e menos fontes de entrada / saída, podem ser usados bits do campo CID para aumentar a capacidade de endereçamento e assim suportar uma arquitectura com mais Adaptadores de terminal.

O campo HEC destina-se a proteger contra erros a totalidade dos campos de controlo do pacote CPS, ou seja, os campos CID, LI, UUI e o próprio HEC. É usado o código cíclico cujo polinómio gerador é p^5+p^2+1. Este campo é calculado através da divisão (módulo 2) pelo polinómio gerador, do produto de p^5 pelo polinómio construído através dos coeficientes dos primeiros 19 bits do cabeçalho do pacote CPS. Os coeficientes do resto da divisão são inseridos no campo HEC, em que o coeficiente do termo p^4 é do bit mais significativo.

Os pacotes CPS, à medida que vão sendo criados, são colocados num FIFO intermédio. Neste FIFO já foi feito o escalonamento dos fluxos de informação de entrada. Estes pacotes têm já a identificação do Canal (CID) a que correspondem, a identificação do Adaptador de terminal a que estão ligados (UUI) e da prioridade, associada à classe de tráfego que lhes é atribuída à entrada (UUI). Os pacotes CPS serão agora segmentados / agrupados em blocos de 48 octetos (ATM_SDUs) de forma a serem encapsulados em células ATM.

- **Encapsulamento ATM_SDU**

O formato dos pacotes ATM_SDU é recordado novamente na Figura 5-5
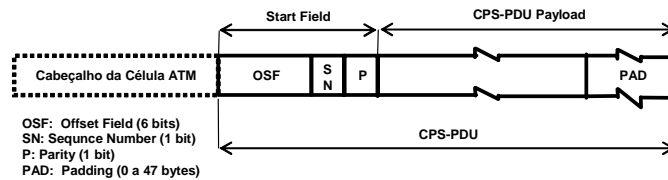
Figura 5-5: Formato dos pacotes ATM_SDU.

Esta estrutura de multiplexagem destina-se a juntar os diversos pacotes CPS, de diversos tamanhos, num único pacote (ATM_SDU). Estes pacotes necessitam de um temporizador de forma a organizar o seu escalonamento para transmissão. A natureza do tráfego de entrada pode ter exigências temporais restritas, o que faz com que um pacote não possa esperar mais do que um valor temporal bem definido. Assim, se o valor deste temporizador for baixo as células ATM poderão ficar parcialmente preenchidas, uma vez que o débito de chegada de pacotes CPS é baixo relativamente ao relógio de multiplexagem. No caso contrário, as células serão totalmente preenchidas mas o atraso de empacotamento aumentará.

Existe um relógio de uso combinado Timer_CU (CU, *Combined Use*), definido na recomendação I.363.2 [ITU97b], que assegura que os pacotes CPS esperem no máximo o tempo indicado pelo Timer_CU antes de serem escalonados para transmissão. O bom dimensionamento deste temporizador permitirá obter uma taxa de ocupação de célula máxima sem degradar significativamente o atraso global. Este relógio é obtido através do relógio derivado da rede.

A seguir descreve-se o procedimento simplificado da criação dos ATM_SDUs, de acordo com os diagramas SDL (SDL, *Specification and Description Language*) da recomendação I.363.2:

1. Espera a chegada de um pacote CPS à fila de pacotes CPS. Quando chega um pacote inicializa o Timer_CU,
2. Constrói novo pacote ATM_SDU. A seguir ao campo STF introduz os octetos, por ordem de saída da fila de pacotes CPS,
3. Se o ATM_SDU tiver sido preenchido antes do Timer_CU expirar e um pacote CPS não tiver sido totalmente colocado dentro do ATM_SDU, memoriza o número de octetos que sobraram para introduzir esse valor no campo OSF do próximo ATM_SDU. Reinicializa o Timer_CU. Salta para o ponto 2,

4. Se não existirem mais pacotes CPS na fila e o Timer_CU expirar, preenche os restantes octetos do ATM_SDU com *padding*. Salta para o ponto 1,

5. Se o Timer_CU expirar e o ATM_SDU não incluir nenhum início de pacote CPS, calcula o valor do OSF em função do início do *padding*. Salta para o ponto 1

5.2.2 Módulo de Recepção

O módulo de recepção do Adaptador de terminal é bastante mais simples uma vez que o escalonamento temporal dos diversos fluxos de entrada é efectuado em sentido inverso. Deste modo, a desmultiplexagem é efectuada directamente à medida que as células ATM vão sendo recebidas. No entanto, é necessário implementar um mecanismo que evite que um pacote ATM_SDU com erro não seja descartado completamente. Com efeito, é necessário efectuar primeiro a desmultiplexagem e analisar os pacotes CPS individualmente no sentido de verificar quais são os que verificam o campo HEC. A Figura 5-6 apresenta o diagrama funcional do módulo de recepção do Adaptador de terminal.
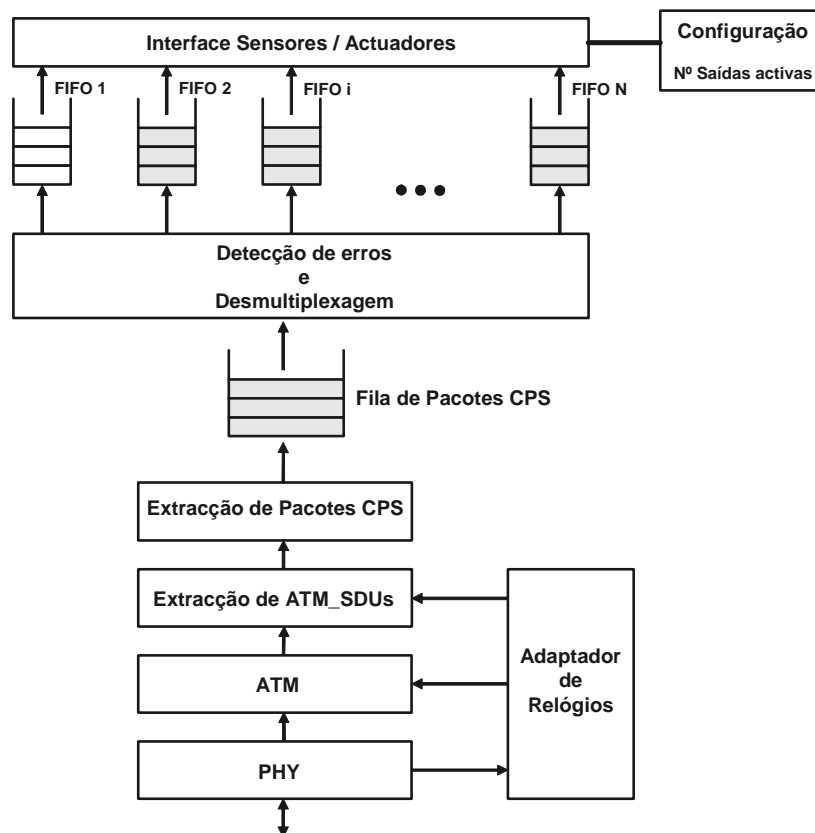
Figura 5-6: Estrutura Funcional do Adaptador de terminal (Módulo de Recepção).

- **Extracção de ATM_SDUs / Extracção de pacotes CPS**

Basicamente, este bloco retira o campo de informação de uma célula ATM, armazenando-o num registo, para ser processado pelo módulo acima. Para a detecção de erros é usado o cabeçalho do ATM_SDU ilustrado na Figura 5-7.
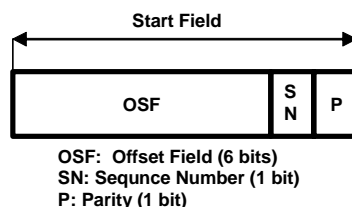
Figura 5-7: Estrutura do cabeçalho de um ATM_SDU (STF, *Start Field*).

O cabeçalho é composto por 3 campos. A seguir é recordado o significado de cada um deles, de acordo com a recomendação I.363.2 [ITU97b]:

OSF: Representa o valor binário do *offset* (medido em octetos) desde o fim do STF até ao início de um pacote CPS ou, na ausência deste, ao início do campo PAD. O valor 47 indica que não existe nenhum início de pacote CPS dentro do ATM_SDU,

SN: Implementa um mecanismo de numeração (módulo 2) da sequência de ATM_SDUs,

P: Bit de paridade. Para detectar erros no STF verifica se a paridade deste é ímpar.

Seguidamente, é descrito o procedimento simplificado para a extracção dos pacotes CPS do fluxo de células ATM (ATM_SDUs), de acordo com os diagramas SDL da recomendação I.363.2 [ITU97b]:

1. Espera a chegada de um ATM_SDU,
2. Na chegada de um pacote ATM_SDU é extraído o cabeçalho. Guarda os valores dos campos OSF, SN e P,
3. Se P e SN não forem verificados todo o pacote é descartado assim como os octetos pendentes do pacote CPS anterior recebido,
4. Se o valor do *offset* for diferente de 0 agrupa os octetos até ao valor do *offset*, aos octetos do pacote CPS pendente. Coloca o pacote CPS na fila de pacotes CPS,
5. Se ainda sobrarem octetos, é verificado o valor do CID. Se for 0, então os octetos correspondem a *padding* e são descartados. O algoritmo salta para o ponto 1. Se não existir mais informação, salta igualmente para o ponto 1,

6. Se o número de octetos restantes for maior que o valor de LI são guardados os octetos do pacote CPS até ao valor de LI. Coloca o pacote CPS na fila de pacotes CPS. Salta para o ponto 5,
7. Se o número de octetos restantes for inferior a LI significa que o resto do pacote CPS acaba no ATM_SDU seguinte. Guarda os octetos restantes e salta para o ponto 1.

- **Detecção de erros e Desmultiplexagem**

Neste módulo é verificada a existência de erros no cabeçalho dos pacotes CPS e efectuada a desmultiplexagem dos vários canais.

Para efectuar a detecção de erros são seguidos os procedimentos normais associados aos códigos cíclicos [Car86]. Neste caso estamos em presença de um código *Hamming* do tipo:

$$(n,k) = (24,19)$$

Significa que, para cada 19 bits de informação, temos 24 bits de código, ou seja:

$$q = n - k = 5$$

em que *q* representa o número de bits de paridade. De acordo com [Car86], este código consegue corrigir erros simples e detectar alguns erros duplos. Para efectuar a correcção de erros é necessário efectuar o cálculo do Síndroma:

$$S(p) = \text{rem}\,[Y(p) / G(p)]$$

S(p) representa o polinómio do Síndroma, Y(p) o polinómio da palavra recebida (cabeçalho do CPS) e G(p) o polinómio gerador do código (p^5+p^2+1). O operador “rem” corresponde ao resto da divisão (módulo 2). A Figura 5-8 ilustra o diagrama funcional do processo de controlo de erros do cabeçalho dos pacotes CPS.

Os pacotes que vão sendo processados são aceites ou rejeitados em função do cálculo do Síndroma. Se o número de erros for igual ou inferior a 1 os pacotes são aceites e, no caso contrário, serão rejeitados.

Após o controlo de erros do cabeçalho dos pacotes CPS, são extraídos os campos CID, UUI e LI. Para cada pacote CPS recebido são escritos LI octetos na fila correspondente ao canal indicado pelo campo CID.
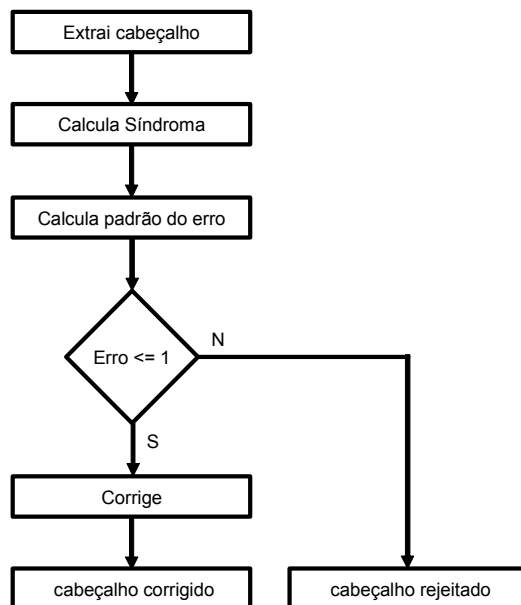
Figura 5-8: Controlo de erros no cabeçalho dos pacotes CPS.

5.3 Concentrador

O Concentrador, à semelhança do Adaptador de terminal, pode ser considerado como um conjunto de máquinas de estado de concentração e expansão que funcionam de uma forma independente. O módulo de concentração efectua a multiplexagem dos pacotes CPS provenientes de várias fontes e de vários Adaptadores de terminais num fluxo agregado, maximizando a eficiência de transmissão. O módulo de expansão efectua a desmultiplexagem dos pacotes CPS, em fluxos separados de acordo com o Adaptador de terminal de destino.

O módulo de concentração necessita de recuperar a estrutura dos pacotes CPS dos vários fluxos de entrada para efectuar nova multiplexagem, optimizando assim a taxa de preenchimento das células ATM e o consequente aumento da eficiência de transmissão na rede. À semelhança do Adaptador de terminal, a multiplexagem dos vários fluxos, provenientes das várias portas de entrada, é efectuada através de escalonamento temporal baseado no atraso requerido pelos serviços associados a cada fluxo.

As funcionalidades de gestão e sinalização, necessárias ao funcionamento em ambientes com equipamentos normalizados, constituindo assuntos laterais ao tema deste trabalho, deverão ser igualmente incluídas no Concentrador. A Figura 5-9 ilustra o princípio de funcionamento do Concentrador.
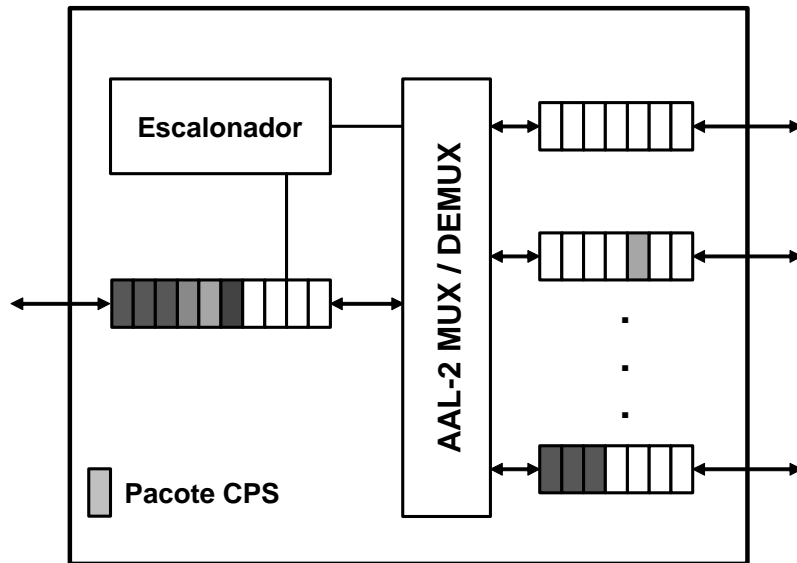
Figura 5-9: Princípio de funcionamento do Concentrador.

A principal vantagem do uso do Concentrador é o de aumentar a eficiência de transmissão na rede, principalmente quando um ou mais Adaptadores de terminal funcionam com uma reduzida ocupação da largura de banda. Este equipamento, efectua o desencapsulamento dos pacotes CPS, provenientes das células ATM das várias portas de entrada (Adaptadores de terminal), para depois efectuar novo encapsulamento destinado à porta de saída. No sentido contrário é feita a operação inversa.

Como foi referido anteriormente, a multiplexagem é baseada em escalonamento temporal, em que o atendimento das filas, correspondentes aos canais de entrada, é controlado pelo Algoritmo de escalonamento do Concentrador.

Se as linhas de entrada tiverem todas o mesmo débito:

$$f_1 = f_2 = ... = f_n = f$$

o débito máximo de saída terá de ser:

$$f_s = n \times f$$

No entanto, como se trata de um concentrador, o débito de saída será bastante mais reduzido, uma vez que a taxa de ocupação de células, proveniente dos Adaptadores de terminal, será previsivelmente inferior a 100%. Quanto menor for o débito de saída maior será a eficiência ou o ganho na multiplexagem. Por outro lado, quanto maior for o débito de saída menor será o

atraso temporal introduzido pelo Concentrador. É através destes pressupostos que será dimensionado o Algoritmo de escalonamento do Concentrador.

A escolha da capacidade de transmissão será um dos recursos a negociar com a rede, juntamente com outros parâmetros de QoS (e.g. Categoria de Serviço e parâmetros de tráfego). Deste modo, a eficiência de transmissão é também dependente da capacidade de transmissão atribuída à ligação.

5.3.1 Módulo de concentração

É o módulo de concentração que efectua as funções mais importantes – aumentar a eficiência de multiplexagem, minimizando o atraso dos serviços que possuam requisitos temporais apertados. Para tal, é necessário recuperar a estrutura dos pacotes CPS a partir das células ATM. Deste modo, a técnica de multiplexagem usada é idêntica à efectuada no Adaptador de terminal assim como grande parte das funcionalidades, conseguindo-se economizar no desenvolvimento da maioria dos módulos. A estrutura funcional do Módulo de concentração está ilustrada na Figura 5-10.
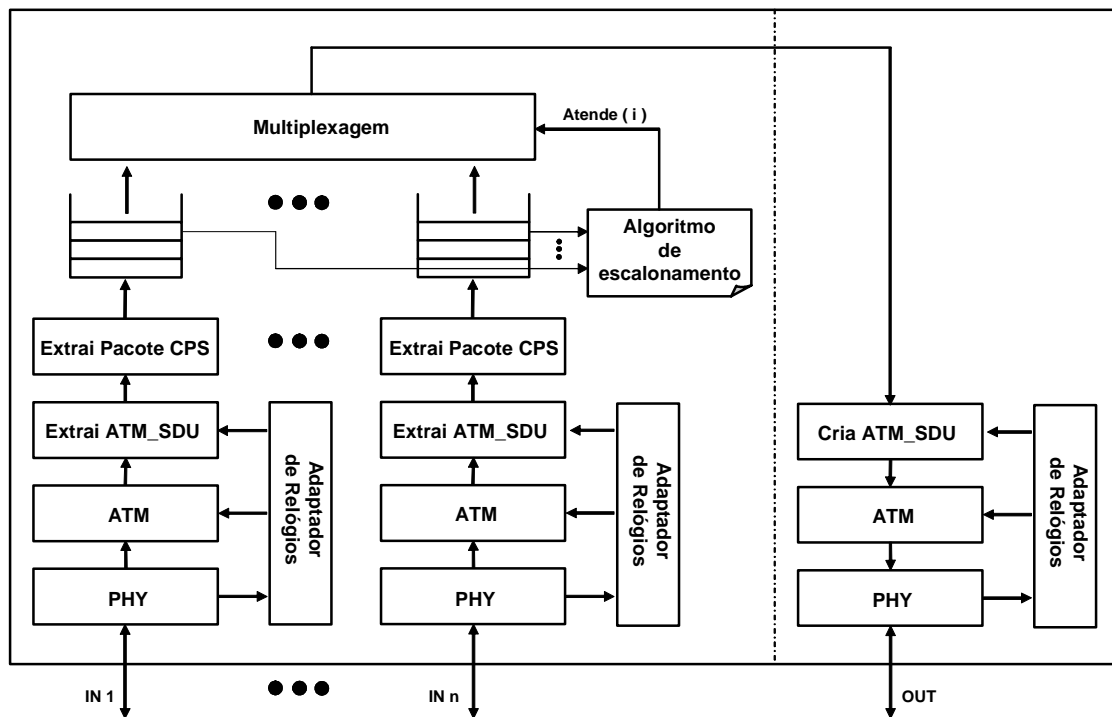
Figura 5-10: Estrutura funcional do Concentrador – módulo de concentração.

Todos os blocos foram já descritos com detalhe nas secções 5.2.1 e 5.2.2. De referir que não é efectuado o controlo de erros ao nível do cabeçalho dos pacotes CPS, uma vez que se supõe que as distâncias entre o Concentrador e os Adaptadores de terminal são curtas e que as linhas de transmissão apresentam taxas de erro baixas.

Existem *n* portas de entrada a concorrer para uma porta de saída. Deste modo, a capacidade da porta de saída deve ser calculada de forma a ser ligeiramente superior à soma dos débitos médios úteis dos pacotes CPS das portas de entrada.

5.3.2 Módulo de expansão

O módulo de expansão efectua a função inversa do módulo de concentração. Extrai os pacotes CPS das células ATM para os encaminhar, em vários fluxos separados de células ATM, para os Adaptadores de terminal de destino. A Figura 5-11 ilustra o diagrama funcional do módulo de expansão do Concentrador.
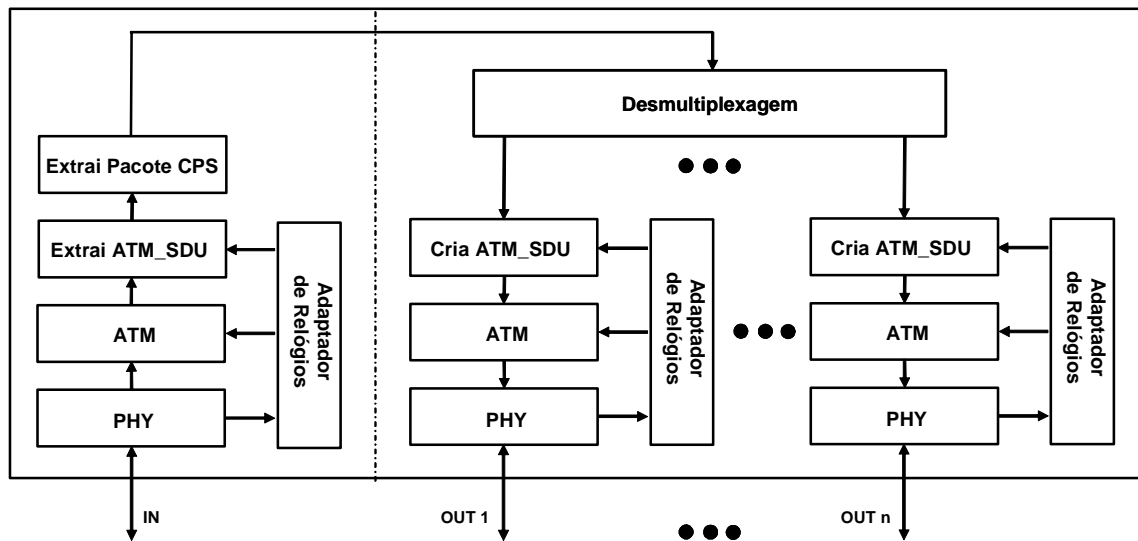
Figura 5-11: Estrutura funcional do Concentrador – módulo de expansão.

À semelhança do módulo anterior, deve também salientar-se que os módulos desenvolvidos são idênticos aos do Adaptador de terminal, sendo praticamente aproveitados na íntegra.

A informação relativa ao endereço do Adaptador de terminal de destino é veiculada no campo UUI, da mesma forma que é efectuada no sentido inverso e descrita na secção 5.2.1.

5.4 Aplicação de Controlo

Para controlar eficazmente a transferência da informação entre os vários elementos integrantes do sistema de aquisição de dados e controlo é indispensável desenvolver, para cada implementação específica, uma aplicação que, numa primeira abordagem e duma forma resumida, proceda à identificação da fonte e ao encaminhamento da informação para o seu destino.

A identificação de cada elemento do sistema, sensor, actuador ou adaptador de terminal, será efectuada, recorrendo quer aos identificadores de caminho e de canal virtual (VPI/VCI) da camada ATM, quer aos identificadores dos canais multiplexados na camada de Adaptação, de acordo com as especificações do protocolo AAL-2.

Requisitos de funcionamento de aplicações de controlo

Embora não seja o objectivo deste trabalho especificar os requisitos para o desenvolvimento da aplicação de controlo, é possível inventariar um conjunto de metodologias genéricas que poderão servir de base ao seu projecto e especificação.

- **Modelos de transferência de Informação**

As aplicações de controlo, que envolvem dispositivos de baixo débito, podem ser classificadas em relação à forma como é efectuada a transferência de informação, entre o fenómeno e o observador. Estas podem ser classificadas como: contínua, orientada ao evento, iniciada pelo observador e híbrida. No modelo contínuo, os sensores transmitem a informação continuamente com um débito pré-determinado. No modelo orientado a eventos os sensores enviam informação apenas quando ocorre um evento de interesse. Neste caso, o observador está interessado na ocorrência de um fenómeno específico ou num conjunto de fenómenos. No modelo iniciado pelo observador os sensores só enviam informação em resposta a um pedido explícito do observador. Finalmente, no modelo híbrido as três estratégias coexistem na mesma aplicação.

Por exemplo, numa aplicação construída para a detecção de intrusos, o modelo de transferência de informação é orientado ao evento, que corresponde à entrada de um intruso na área monitorada. Se o modelo de encaminhamento da informação na rede é baseado em *flooding*, os sensores que estiverem fisicamente próximos detectarão o intruso ao mesmo tempo e vão enviar, simultaneamente, informação para o observador. Estas comunicações

concorrentes na vizinhança de um fenómeno podem gerar contenção no meio de comunicação, aumentando a probabilidade de perda de informação crítica e a latência em reportar o evento.

- **Modelos dinâmicos de rede**

Uma rede de sensores forma um caminho entre o fenómeno e o observador. O objectivo do protocolo na rede de sensores é criar e manter este caminho ou múltiplos caminhos sob condições dinâmicas. Sem perda de generalidade esta discussão assume um único observador. Múltiplos observadores podem ser suportados com instâncias múltiplas de um único observador.

- **Tolerância a falhas**

Os sensores podem falhar devido a más condições ambientais ou por falta de energia. Uma vez que nem sempre é possível a troca dos dispositivos em tempo útil, a aplicação deve ser tolerante a falhas, ou seja, é desejável que as falhas não catastróficas sejam transparentes para a aplicação.

A Aplicação de controlo executará igualmente as funções de controlo de tráfego, de acordo com os requisitos de cada aplicação concreta, bem como as funções de sinalização e de gestão, indispensáveis à interligação de equipamentos normalizados.

Síntese

Neste capítulo foram especificados os módulos constituintes da arquitectura proposta para a adaptação de tráfego de baixo débito em aplicações de controlo, de modo a interligar uma grande quantidade de dispositivos de baixo débito, maximizando a eficiência de transmissão da rede e garantindo a QoS (atraso) requerida pelos serviços a suportar.

Foram descritos os módulos fundamentais: o Adaptador de terminal e o Concentrador, bem como a interligação dos vários componentes do sistema. Em relação ao Adaptador de terminal foi apresentada a sua estrutura funcional, sendo descritos com detalhe os módulos de emissão e recepção. O Concentrador efectua operações de multiplexagem e desmultiplexagem, que são executadas nos seus módulos de concentração e de expansão. Nestes equipamentos, é usado o protocolo AAL-2 como

suporte de toda a estrutura de multiplexagem. Fez-se ainda referência à necessidade de implementação de Algoritmos de escalonamento no Adaptador de terminal e no Concentrador, bem como aos requisitos de funcionamento da Aplicação de controlo.

No capítulo seguinte será efectuada a análise de desempenho do sistema, em função de diferentes objectivos de desempenho, traduzidos em Algoritmos de escalonamento desenvolvidos de acordo com os requisitos dos serviços e com as capacidades da rede.

6

Análise de desempenho do sistema

Para avaliar as qualidades e limitações dos modelos propostos, foram realizadas simulações com tráfego característico das redes industriais, onde os sistemas de controlo se inserem, bem como com outro tipo de tráfego típico das redes de comunicação usadas para interligar os módulos propostos.

O estudo apresentado no capítulo 4 acerca da adaptação de tráfego de baixo débito em redes de comunicação conduziu à especificação de uma arquitectura composta por dois módulos fundamentais para o suporte de aplicações de controlo. Esses módulos, o Adaptador de terminal e o Concentrador, apresentados com detalhe no capítulo 5, visam resolver dois problemas fundamentais:

- Integrar o maior número de dispositivos e sistemas,
- Garantir uma alta eficiência na agregação dos diversos fluxos de informação garantindo a Qualidade de Serviço (QoS, *Quality of Service*) negociada.

O primeiro problema foi resolvido com a escolha da tecnologia ATM (ATM, *Asynchronous Transfer Mode*) como suporte de infra-estrutura de rede e da escolha do protocolo AAL-2 (AAL-2, *ATM Adaptation Layer – type 2*) para o suporte da estrutura de multiplexagem das diversas fontes de tráfego.

Para a resolução do segundo problema será necessário o estudo de algoritmos de escalonamento de tráfego de modo a definir mecanismos que garantam o atendimento prioritário a fluxos que possuam requisitos de atraso mais apertados. O escalonamento de tráfego é feito em duas fases. A primeira é efectuada no Adaptador de terminal onde os diversos fluxos concorrem para uma dada capacidade de transmissão. Nesta fase, é necessário implementar um algoritmo que garanta a satisfação dos requisitos de atraso dos diversos fluxos que se apresentam à entrada maximizando, ao mesmo tempo, a ocupação da largura de banda disponível. A segunda fase é efectuada no Concentrador, onde será necessário implementar um mecanismo de escalonamento que permita optimizar a agregação de tráfego proveniente de diversos Adaptadores de terminal, garantindo também a satisfação dos requisitos temporais impostos pelos diversos fluxos individuais.

No sentido de avaliar o desempenho do sistema, será necessário implementar mecanismos que permitam testar o comportamento dos vários algoritmos de escalonamento propostos. Para tal será necessário desenvolver um sistema que permita testar e avaliar, duma forma quantitativa, as diversas soluções apresentadas. O sistema de testes apresentado neste capítulo consiste num conjunto de modelos simplificados dos módulos apresentados no capítulo 5 mas que, no entanto, possuem as características necessárias à obtenção dos resultados essenciais para a avaliação dos diversos algoritmos.

Para a avaliação dos algoritmos, é definida uma configuração de referência que permite identificar as diversas componentes que contribuem para o atraso total da informação ao longo dos vários troços do sistema. Deste modo, será possível atribuir a cada módulo uma parcela desse atraso que permitirá avaliar individualmente o desempenho dos algoritmos de escalonamento do Adaptador de terminal e do Concentrador.

Os testes efectuados ao Adaptador de terminal caracterizaram-se pela análise da resposta dos vários módulos, em que são usados diversos cenários de tráfego para carregar o sistema. Concretamente, são usados dois cenários: o primeiro permite avaliar a capacidade de integração de fluxos de informação associados a serviços com requisitos de QoS diferentes e o segundo avalia a capacidade do sistema suportar um elevado número de fluxos de baixo débito duma forma eficiente.

Para a avaliação do Concentrador, utilizou-se um cenário em que são gerados pacotes CPS de tamanho variável, em cada porta de entrada, e são medidos os atrasos máximos dos fluxos das diversas classes assim como os tamanhos das filas correspondentes. Estas classes de tráfego, definidas no capítulo 4, são recordadas a seguir:

- Atraso Máximo (AM),

- Dados (D),
- Esforço Mínimo (EM).

A descrição das fontes geradoras de tráfego e a sua modelização é efectuada na secção 6.3, assim como a descrição das funções geradoras de números aleatórios. Seguidamente, nas secções 6.4 e 6.5 são apresentados e analisados os resultados da avaliação efectuada aos Algoritmos de escalonamento do Adaptador de terminal e do Concentrador.

6.1 Caracterização do sistema de testes

Tendo em vista a avaliação de desempenho do sistema proposto para adaptação de tráfego de baixo débito foram implementados, com as convenientes simplificações, os módulos do Adaptador de terminal e do Concentrador, apresentados no capítulo anterior, bem como modelos de simulação das fontes geradoras de tráfego.

De forma a poder optimizar o trabalho de especificação, simulação e desenvolvimento, optou-se por usar como suporte um PC (PC, *Personal Computer*) baseado numa arquitectura com processador Pentium. A especificação dos diversos módulos do sistema de testes foi efectuada em linguagem C sobre o sistema operativo Linux [Cab05]. Em relação ao protocolo AAL-2, toda a programação foi efectuada respeitando o mais possível o algoritmo real, ou seja, o que é apresentado na recomendação I.363.2 do ITU-T [ITU97b], seguindo de perto os diagramas SDL (SDL, *Specification and Description Language*) da própria recomendação.

Os módulos desenvolvidos para o sistema de testes poderão ser reutilizados na fase de implementação sem necessidade de efectuar grandes modificações. Seguidamente, é feita a descrição dos sistemas de testes para avaliação do Adaptador de terminal e do Concentrador.

6.1.1 Sistema de testes para avaliação do Adaptador de terminal

Como foi referido anteriormente, o Adaptador de terminal destina-se a efectuar o interface entre os dispositivos envolvidos numa Aplicação de controlo e a rede de suporte. Para avaliar o seu desempenho especificou-se um sistema simplificado, do ponto de vista de uma possível implementação final, que permitirá quantificar os parâmetros principais relacionados com o seu

comportamento perante diversos tipos de tráfego. A Figura 6-1 mostra a sua estrutura funcional.
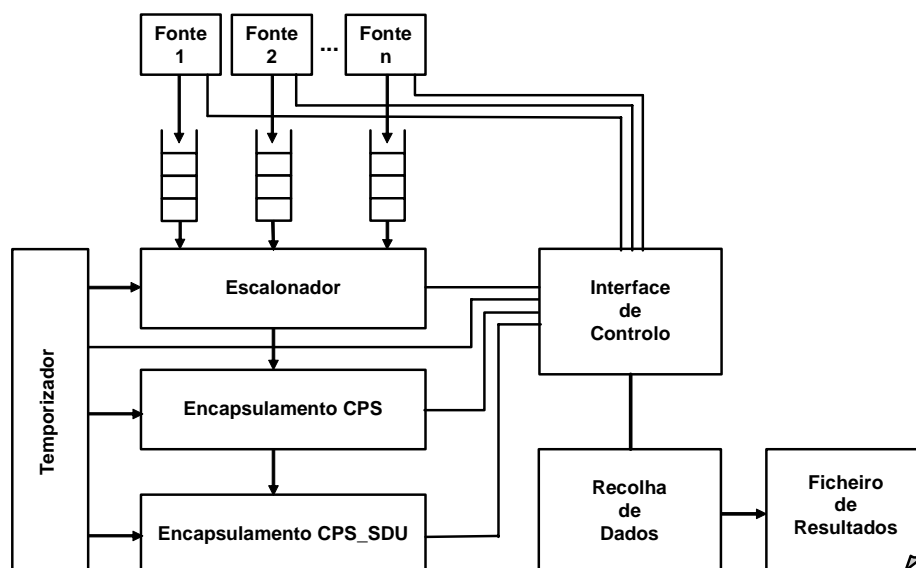
Figura 6-1: Estrutura do sistema de testes para avaliação do Adaptador de terminal.

O sistema, implementado por um conjunto de programas em C [Cab05], é constituído por diversos componentes que permitem efectuar a simulação do comportamento dos módulos de emissão do Adaptador de terminal relacionados com o escalonamento de informação. Em seguida serão descritos cada um dos blocos funcionais:

- **Interface de controlo:**

Este módulo permite efectuar o controlo de toda a simulação. Efectua a gestão dos diversos módulos sincronizado pelo Temporizador. É neste módulo que se define o tempo de simulação.

- **Fontes de informação:**

Para cada fonte de informação é necessário definir as características de cada fluxo. Existe, para cada fonte, um módulo em que são especificados os seguintes parâmetros:

- Débito - Constante ou variável,
- Valor médio do débito,
- Classe de tráfego (de acordo com o especificado na secção 4.1.3),
- Distribuição estatística usada – no caso do fluxo não ser de débito constante.

Quando se inicia a simulação, a informação gerada por cada fonte é armazenada num FIFO (FIFO, *First In First Out*), implementado no sistema operativo através de um *named pipe* que permite a comunicação entre o processo associado à fonte e o processo do escalonador.

Mais à frente, na secção 6.3, serão descritas, com mais detalhe, as características principais das fontes de tráfego usadas assim como os modelos escolhidos para a sua representação.

- **Escalonador:**

Este módulo é responsável pelo escalonamento de informação de acordo com o algoritmo usado. Para efectuar o escalonamento da informação, ou seja, decidir qual a fila a atender, cada algoritmo tem acesso aos seguintes elementos:

- o instante de chegada dos octetos "à cabeça" de cada FIFO,
- o tamanho actual de cada FIFO,
- a classe de tráfego.

Em função dos elementos anteriores, o algoritmo de escalonamento irá escolher a fila a atender. Uma vez escolhida a fila a atender o escalonador irá ler, do FIFO correspondente, o maior número de octetos possível de modo a preencher um pacote CPS (CPS, *Convergence Packet Sublayer*). Nesta fase podem acontecer três situações. A primeira corresponde ao número de octetos lido ser inferior ao valor máximo do tamanho de pacotes CPS. Neste caso o pacote terá um comprimento correspondente ao número de octetos lido. A segunda situação corresponde ao preenchimento do pacote CPS com um número de octetos igual ao valor máximo. Finalmente, a terceira situação ocorre quando, no FIFO, existem mais octetos do que aqueles que o escalonador consegue ler. Neste caso, os octetos que não foram lidos ficarão em espera até o algoritmo decidir atender novamente essa fila.

A leitura dos octetos dos FIFOs é sincronizada por um relógio designado por *Loopclock*, que é derivado do relógio do sistema operativo e fornecido pelo bloco Temporizador. A frequência do *Loopclock* é um parâmetro muito importante que afecta directamente a eficiência de multiplexagem e, ao mesmo tempo, garante o cumprimento dos atrasos máximos dos fluxos que atravessam o Adaptador de terminal. Deste modo, o valor da frequência do *Loopclock* será um dos parâmetros a avaliar na simulação dos diversos algoritmos apresentados. Este valor será limitado inferiormente pelo princípio de que o débito da soma dos fluxos médios, que entram no Adaptador de terminal, tem de ser inferior ao débito do fluxo agregado, uma vez que são adicionados cabeçalhos aos pacotes resultantes e o débito instantâneo pode ser superior ao débito médio (*burstiness*):

$$\sum_i \overline{f_i} < f_{Loopclock} \quad (6\text{-}1)$$

Por outro lado, se a frequência do relógio tiver um valor muito elevado, relativamente à soma do valor médio dos débitos de entrada, a eficiência de multiplexagem será baixa. Assim, a escolha da frequência do *Loopclock* será feita através de um compromisso entre estes dois factores.

- **Encapsulamento CPS:**

Os octetos resultantes da leitura do FIFO escolhido pelo algoritmo de escalonamento são passados para este bloco que vai adicionar o cabeçalho de acordo com o explicado na secção 5.2.1. São calculados os campos CID, LI, UUI e HEC, num total de 3 octetos. O pacote de informação é, em seguida, enviado para o bloco seguinte.

- **Encapsulamento CPS_SDU:**

Este módulo tem como função principal a segmentação da informação, recebida do bloco anterior, em blocos de 48 octetos de forma a poderem ser mapeados no campo de informação das células ATM. Este procedimento foi também já explicado na secção 5.2.1. São calculados os campos OSF, SN e P e é introduzido *padding* quando não houver informação útil para preencher a célula.

- **Temporizador:**

No sistema de simulação, todos os módulos são sincronizados pelo relógio do sistema operativo que é função do relógio do CPU. Num sistema real este seria o relógio de rede.

- **Recolha de dados:**

Neste módulo serão recolhidos todos os elementos necessários à avaliação do desempenho dos algoritmos a simular. Este módulo recolhe informação de todos os restantes módulos ao longo de toda a simulação. Os principais valores recolhidos são os seguintes:

- Atraso máximo de cada fluxo,
- Tamanho máximo de cada FIFO,
- Número de octetos gerado por cada fonte,
- Número de octetos gerados nos módulos de encapsulamento.

O primeiro parâmetro permite avaliar se o atraso que cada fluxo sofreu ao atravessar o Adaptador de terminal é inferior ao máximo especificado nos fluxos pertencentes às classes de Atraso Máximo. O atraso é calculado através da medição da diferença entre o registo do instante temporal de escrita de cada octeto no FIFO do módulo de encapsulamento CPS_SDU (ver Figura 6-1) e o registo do instante de escrita no FIFO de entrada. Para cada fila são mantidas variáveis que guardam os valores máximos associados.

O segundo parâmetro permite monitorar o tamanho de cada FIFO de modo a prevenir *overflows* e, num sistema real, permitirá dimensionar a capacidade máxima de cada FIFO. Finalmente, os dois últimos indicam a quantidade de informação que é gerada à entrada e à saída do Adaptador de terminal. A partir destes valores são calculados os seguintes parâmetros:

- Quantidade de pacotes CPS produzidos,
- Valor médio de octetos por CPS,
- Valor médio do *overhead* dos pacotes CPS.

Estes últimos parâmetros permitem avaliar a eficiência de multiplexagem. Como foi referido no capítulo 3, os pacotes CPS têm tamanho variável. No entanto, o número de octetos do cabeçalho é fixo (3 octetos). Deste modo, o *overhead* é função do tamanho do pacote CPS, de acordo com a equação 6-2:

$$Overhead = \frac{TamanhoCPS - NumeroOctetosInfo}{TamanhoCPS} \ x \ 100\% \qquad (6\text{-}2)$$

No 2.º termo da equação anterior, o valor do numerador é fixo – 3 octetos. A Figura 6-2 apresenta um gráfico da variação do *overhead* em função do tamanho do pacote.

O valor máximo do *overhead* é de 75%, correspondente a pacotes com 1 octeto de informação útil. Os valores mínimos são de 6,25% e 4,69%, respectivamente para pacotes de tamanho 48 e 64 octetos.

A recomendação I.363.2 do ITU-T [ITU97b] especifica um valor por omissão máximo de 45 octetos. Apesar da recomendação suportar o uso de pacotes com tamanho máximo de 64 octetos, este valor não foi usado na avaliação dos algoritmos uma vez que valores entre 45 e 64 não são permitidos e, desse modo, ser difícil uma análise uniforme de desempenho em função do tamanho do pacote CPS.
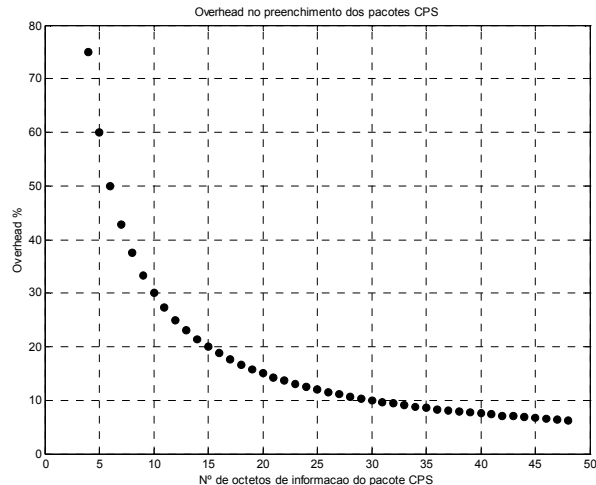
Figura 6-2: Variação do *overhead* em função do tamanho o pacote CPS.

- **Ficheiros de resultados**

Para mais fácil manipulação da informação recolhida na simulação e também para produzir os ficheiros de entrada que serão usados na avaliação do Concentrador, são criados dois ficheiros. Um dos ficheiros armazena todos os pacotes CPS_SDU gerados à saída do Adaptador de terminal. O segundo guarda todos os valores obtidos pelo módulo de Recolha de dados. Num sistema real, o primeiro ficheiro corresponde ao fluxo de dados enviado para preencher o campo de informação de uma célula ATM, ou seja, o seu tamanho será sempre um múltiplo de 48 octetos.

Cenários de Simulação

A avaliação dos algoritmos de escalonamento do Adaptador de terminal e do Concentrador terá de ser efectuada mediante a utilização de cenários de simulação que imponham situações limite, de forma a ser possível dimensionar os diversos parâmetros, associados a cada algoritmo, e assim se conseguir definir uma solução genérica para a adaptação de tráfego de baixo débito em aplicações de controlo.

Como já foi várias vezes mencionado, os objectivos principais a atingir no escalonamento dos fluxos de informação são:

1. Permitir a integração de fontes de tráfego de vários tipos, garantindo os requisitos de atraso de cada fonte,
2. Maximizar a ocupação da largura de banda de forma a reduzir os custos de transmissão,
3. Integrar um número elevado de fontes de baixo débito.

Para tal, foram definidos dois cenários que permitirão avaliar a capacidade dos algoritmos de escalonamento atingirem os objectivos atrás mencionados. O primeiro permitirá avaliar a capacidade de cada algoritmo atingir os dois primeiros objectivos enquanto que o segundo permitirá avaliar a capacidade de se atingirem os dois últimos.

Cenário 1

Este cenário de simulação permite avaliar a capacidade dos algoritmos de escalonamento de suportarem a integração de fontes com requisitos de tráfego e atraso diferentes assim como a capacidade de optimizar a ocupação da largura de banda de transmissão.

Para tal, será necessário avaliar o comportamento dos algoritmos perante um cenário em que as fontes usadas possam produzir resultados em que seja possível retirar informação acerca da eficiência de multiplexagem, dos atrasos máximos dos diferentes fluxos, do tamanho das filas de espera associadas a cada fluxo e do valor do *Loopclock* máximo que satisfaz os requisitos de todos os serviços.

Deste modo, são usadas como entradas um conjunto de fontes com as características apresentadas na Tabela 6-1.

Tabela 6-1: Caracterização das fontes do cenário 1.

Fonte	Débito médio	Tipo	Peso (%)
Voz	16kbit/s	constante	14,17
Sensor	800bit/s	constante	0,71
Dados	16kbit/s	variável	14,17
Interruptores	80bit/s	aleatório	0,071
Vídeo	80kbit/s	variável	70,87
Total	**112 880bit/s**	---------	**100**

Às fontes do tipo Voz, Sensor e Interruptores será atribuída a classe do tipo AM, à fonte do tipo Dados a classe D e à fonte de Vídeo é atribuída a classe EF. Cada serviço da classe do tipo AM terá um atraso máximo associado em função dos requisitos definidos para cada serviço. Neste cenário, o serviço que impõe mais restrições, em termos de atraso, será o serviço de Voz. Em termos de débito, o serviço de Vídeo é aquele que carrega o sistema com a maior quantidade de informação.

A última coluna da Tabela 6-1 indica os pesos de cada serviço em função do débito médio total. Este valor dá uma ideia da percentagem de informação média que cada serviço produz relativamente à média total.

Como foi referido na secção 6.1.1, em cada intervalo de tempo dado pelo *Loopclock*, o escalonador tentará ler o maior número de octetos do FIFO escolhido pelo algoritmo de escalonamento. Com este cenário, o valor máximo do período do *Loopclock* será:

$$Loopclock_{max} = \frac{45 \times 8}{112880} = 3{,}19\text{ms} \qquad (6\text{-}3)$$

O valor indicado na equação 6-3 corresponde à situação em que o escalonador consegue encher pacotes CPS com 45 octetos e supondo que todos os fluxos de entrada têm débito constante (o que na prática não se verifica). Deste modo, o valor dado pela equação 6-3, permite indicar um valor máximo, abaixo do qual se deve procurar o valor adequado que satisfaça os objectivos pretendidos. Quanto mais baixo for o período do *Loopclock* mais baixa será a eficiência de multiplexagem, o que conduz à procura de um valor do *Loopclock* o mais próximo possível do indicado na equação 6-3.

Cenário 2

Com este cenário de simulação pretende-se avaliar a capacidade de suporte de um grande número de fontes de baixo débito assim como maximizar a eficiência de multiplexagem de forma a conseguir economizar a largura de banda de transmissão.

Deste modo, este cenário de simulação serve para analisar o comportamento do escalonador, à medida que se vão introduzindo cada vez mais fontes na entrada. Neste cenário de simulação serão usadas apenas fontes do tipo sensor e dados, uma vez que se prevê que sejam estas as que existam com maior predominância neste tipo de aplicações. Na Tabela 6-2 estão indicadas as características das fontes usadas no cenário 2.

Tabela 6-2: Caracterização das fontes do cenário 2.

Fonte	Débito médio	Tipo
Sensor	800bit/s	constante
Dados	16kbit/s	variável

O comportamento do algoritmo será analisado em duas variantes. A primeira consiste em partir de um número fixo de fontes do tipo Sensor e ir acrescentando fontes do tipo Dados, enquanto

que, na segunda, será feito o inverso, ou seja, a partir de um número fixo de fontes de Dados irão sendo acrescentadas fontes do tipo Sensor.

Os resultados apresentados serão apenas aqueles que maximizem a ocupação da largura de banda, ou seja, possuam o valor do *Loopclock* máximo que satisfaça os requisitos de atraso dos serviços da classe AM. Deste modo, será necessário calcular, para cada simulação, o valor indicativo do *Loopclock* máximo:

$$Loopclock_{max} = \frac{45 \times 8}{DébitoMédioTotal} \quad (6\text{-}4)$$

em que o valor do Débito Médio Total será o somatório dos débitos médios individuais de todos os serviços. À semelhança do valor dado pela equação 6-3, este será um majorante e nunca será atingido na prática.

6.1.2 Sistema de testes para avaliação do Concentrador

Para a avaliação do Concentrador, optou-se por um sistema de testes que aproveita grande parte da estrutura desenvolvida para o Adaptador de terminal. Este modelo simplificado permite avaliar os Algoritmos de escalonamento do Concentrador tendo como entradas um conjunto de portas que recebem o tráfego proveniente de diversos Adaptadores de terminal. A Figura 6-3 mostra a sua estrutura funcional.
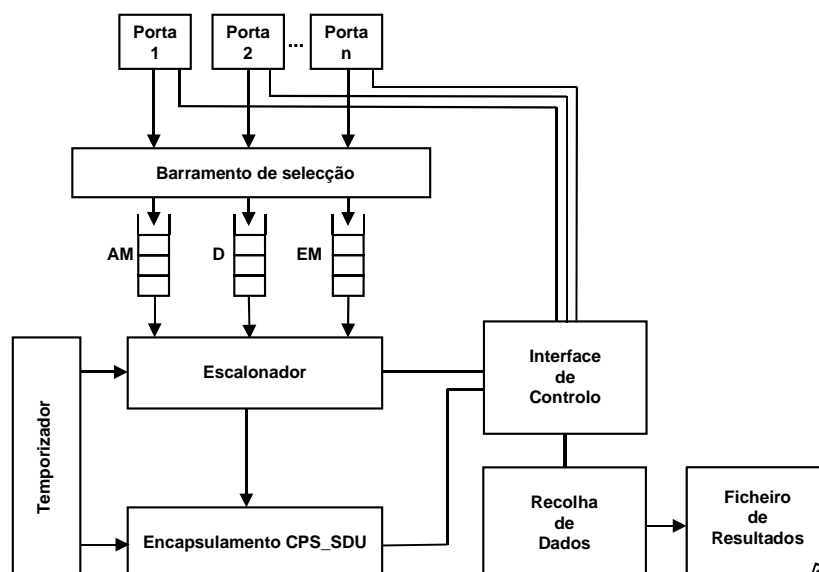
Figura 6-3: Estrutura do sistema de testes para avaliação do Concentrador.

Todos estes módulos foram já descritos na secção anterior, em que apenas se substituíram as fontes geradoras de tráfego por portas de entrada que servirão para gerar tráfego já formatado em pacotes CPS. Com efeito, não é implementado, neste sistema, o desencapsulamento prévio dos pacotes CPS_SDU, provenientes de cada Adaptador de terminal, que terá de existir num sistema real. O tráfego produzido pelos geradores de pacotes CPS é introduzido directamente nas diversas portas de entrada deste sistema de testes.

O escalonador deste módulo será mais simples que o desenvolvido para o Adaptador de terminal, uma vez que o algoritmo usado terá menos parâmetros de entrada como consequência da informação relativa ao atraso máximo, associada aos fluxos de classe AM, não ser transportada nos pacotes CPS. Deste modo, não será possível implementar um mecanismo de prioridade, baseado no parâmetro de Atraso Máximo do género do implementado no Adaptador de terminal. Por outro lado, será mantida a estrutura de pacotes CPS como unidade elementar de multiplexagem. A definição do Algoritmo de escalonamento do Concentrador e a sua avaliação serão apresentadas com detalhe na secção 6.5.

O módulo de Recolha de dados efectua o cálculo dos seguintes parâmetros:

- Atraso máximo dos fluxos associados a cada classe de tráfego,
- Tamanho máximo dos FIFOs,
- Quantidade de octetos rejeitados (*drop out*) dos pacotes de classe EM.

Devido às características inerentes ao funcionamento do Concentrador, será apenas possível implementar mecanismos de prioridade que permitam que o tráfego de classe AM seja atendido duma forma prioritária em relação ao das outras classes. Deste modo, o desempenho dos diversos algoritmos será avaliado baseado na quantificação do atraso máximo que este módulo introduz a serviços de classe AM.

No caso do nível de concentração ser elevado, ou seja, quando a soma dos fluxos médios de entrada é superior à capacidade de saída, o escalonador terá de rejeitar pacotes de classe EM de forma a poder satisfazer os restantes requisitos.

Finalmente, é de referir que, ao contrário do Adaptador de terminal, o Concentrador não introduz *overhead* à informação recebida, uma vez que os pacotes CPS de entrada, provenientes de cada Adaptador de terminal, já contêm toda a informação nos respectivos cabeçalhos acerca da fonte e do Adaptador de terminal de onde são provenientes e, como tal, não é necessário adicionar nem manipular nenhuma desta informação.

- **Geradores de pacotes CPS**

Para simular o comportamento do Concentrador recorreu-se a um mecanismo artificial de geração de pacotes CPS aplicado a cada uma das portas de entrada. No sistema proposto, o número máximo de portas é de 8 (i.e. são usados os 3 primeiros bits do campo UUI) que corresponde a tráfego gerado por 8 Adaptadores de terminal. A Figura 6-4 ilustra o mecanismo de geração de pacotes CPS.
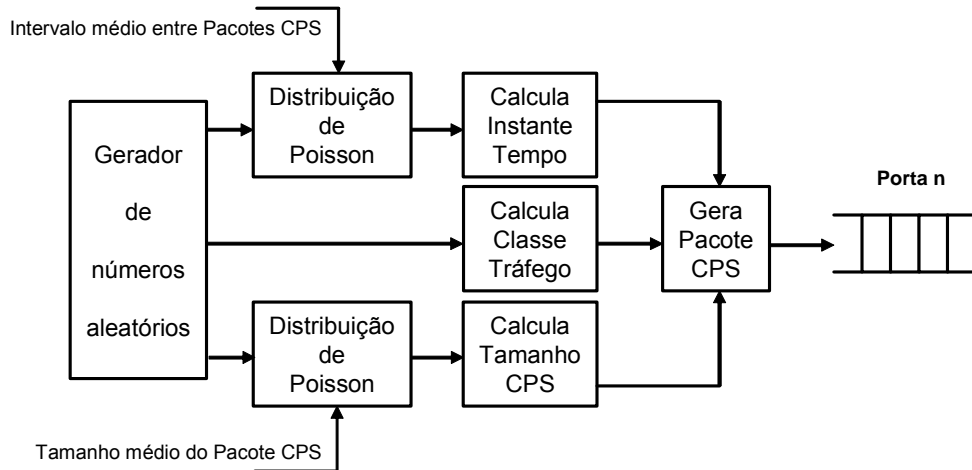
Figura 6-4: Diagrama funcional do mecanismo de geração de pacotes CPS.

São calculados aleatoriamente dois parâmetros, seguindo a distribuição de Poisson: o instante de geração e o tamanho do pacote CPS. Para atribuir a classe de tráfego é gerado aleatoriamente, com igual probabilidade, um valor que pode ser 0, 1 ou 2. Estes valores estão associados, respectivamente, às classes de tráfego AM, D e EM. O módulo Gera Pacote CPS vai produzir um pacote CPS, em que o instante de tempo, o tamanho e a classe de tráfego são indicados pelos módulos a montante.

6.2 Configuração de referência

Com o objectivo de se poder conhecer os valores parciais e totais dos atrasos de transmissão da informação ao longo da rede é necessário a definição de uma configuração de referência que possa servir de base para a análise dos vários módulos do sistema. Essa configuração é baseada na estrutura apresentada na Figura 4-4. Para tal é necessário obter os valores máximos para os atrasos de transmissão nos diversos segmentos ao longo da rede. A Figura

6-5 apresenta a configuração de referência onde são evidenciados os diversos atrasos ao longo dos vários segmentos de rede, enquanto que na Tabela 6-3 é feita a sua descrição.
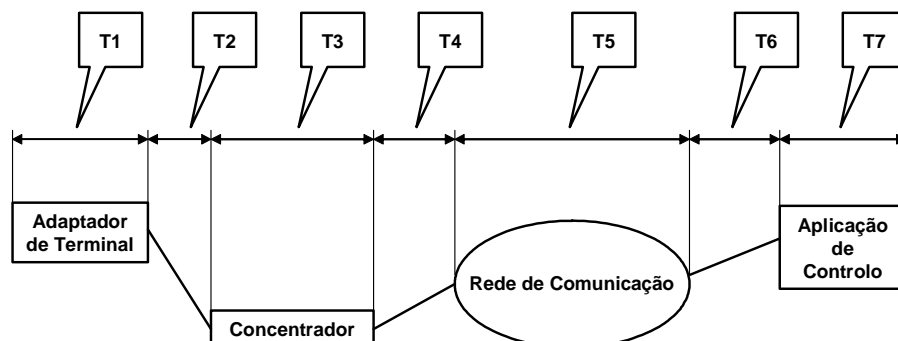
Figura 6-5: Configuração de referência para determinação dos tempos de transmissão do sistema.

Tabela 6-3: Definição dos atrasos de transmissão parciais.

T_1	Atraso da informação provocado pelo escalonamento efectuado no Adaptador de terminal
T_2	Tempo de propagação no troço de ligação entre o Adaptador de Terminal e o Concentrador
T_3	Atraso da informação provocado pelo escalonamento efectuado no Concentrador
T_4	Tempo de propagação no troço de ligação entre o Concentrador e a Rede de Comunicação
T_5	Atraso no interior da Rede de Comunicação
T_6	Tempo de propagação no troço de ligação entre a Rede de Comunicação e a Aplicação de Controlo
T_7	Tempo de processamento da informação na Aplicação de Controlo

Dos atrasos apresentados na Tabela 6-3, podemos considerar dois grupos, de acordo com a sua ordem de grandeza. O primeiro grupo, composto pelas componentes T_2, T_4 e T_6, caracteriza-se por o atraso ser, aproximadamente, função da distância. No segundo grupo, constituído pelas componentes T_1, T_3, T_5 e T_7, o atraso depende dos seguintes factores: escalonamento, filas de espera (e.g. comutadores), empacotamento e processamento de informação (e.g. Aplicação de controlo). Este último grupo é composto por componentes cuja ordem de grandeza é bastante superior às do primeiro.

Para efectuar a análise de desempenho será necessário quantificar o atraso da informação no Adaptador de terminal e no Concentrador (T_1 e T_3) uma vez que todas as outras componentes são determinadas, à partida, pelo comprimento das ligações, pela negociação dos parâmetros

de tráfego e pelo tempo de processamento da Aplicação de controlo. Deste modo, para melhor analisar o atraso global, este é decomposto por três parcelas:

$$T = T_1 + T_3 + T_{garantido} \quad (6\text{-}5)$$

Em que o valor de $T_{garantido}$ é a soma de todas as componentes à excepção de T_1 e T_3. Deste modo, para avaliar o desempenho do Adaptador de terminal e do Concentrador, em termos de atraso introduzido, bastará verificar se o atraso máximo que é imposto a cada um é cumprido. Assim, na simulação dos vários algoritmos de escalonamento, a avaliar em ambos os módulos, é verificado apenas o cumprimento do atraso parcial e não do atraso global.

No projecto de um sistema real será necessário quantificar o atraso correspondente à componente $T_{garantido}$ para se poder atribuir limites a T_1 e T_3.

6.3 Fontes geradoras de tráfego

A especificação completa do sistema a desenvolver necessita de uma caracterização das várias fontes geradoras de tráfego não só em termos de débito mas também em função da QoS (atraso) requerida por cada serviço. Em função destes parâmetros, o sistema deverá efectuar os procedimentos necessários para garantir o suporte do serviço com o atraso pretendido. Essa garantia terá de ser assegurada por duas entidades: a rede e os módulos do sistema onde é efectuado escalonamento temporal. No primeiro caso os parâmetros de QoS são negociados e atribuídos quando é estabelecida a ligação, enquanto que no segundo a garantia da satisfação do atraso é assegurada pelo Adaptador de terminal e pelo Concentrador.

Deste modo, para avaliar e dimensionar os algoritmos de escalonamento, será necessário simular o comportamento destes, tendo como entradas fontes geradoras de tráfego apropriadas. Embora o objectivo deste estudo seja o de integrar o maior número possível de fontes de baixo débito, será desejável que o modelo proposto possa também integrar outros tipos de tráfego, característicos de aplicações de controlo, que possuem requisitos de débito e atraso diferentes. Neste sentido, será necessário avaliar se o sistema apresenta uma boa resposta a serviços com requisitos de atraso temporal apertados suportados, duma forma integrada, com outros em que esses requisitos não são importantes mas que produzem um fluxo elevado de informação. Por exemplo, consideremos o cenário da Figura 6-6, em que se apresenta um exemplo simples onde são suportados 3 tipos de aplicações:

- sistema de aquisição de imagens (débito variável),
- serviço de voz (débito constante),
- sistema de actuação múltipla de dispositivos (baixo débito, aleatório e esporádico).
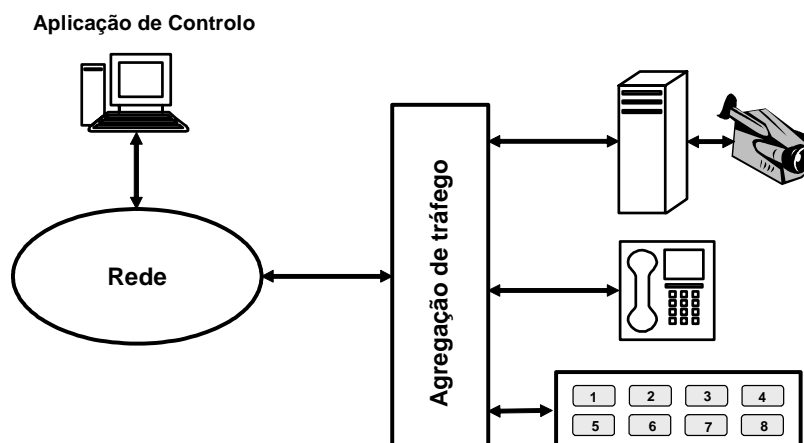
Figura 6-6: Cenário básico de um sistema de suporte integrado de três aplicações com diferentes requisitos temporais.

Neste caso, é importante verificar se o fluxo mais elevado de informação, produzido pelo sistema de aquisição de imagens, não afecta o transporte das outras duas aplicações, sem serem excedidos os tempos de atraso máximos exigidos por cada uma delas, ou seja, é preciso verificar se o escalonamento dos diversos fluxos é efectuado de forma eficiente.

A escolha das diversas fontes teve em conta, por um lado o cuidado de usar as mais genéricas e de uso mais vulgar em aplicações de baixo débito e, por outro, a necessidade de gerar tráfego com características especiais e de débito mais elevado de forma a avaliar não só a capacidade de agregação mas também a capacidade de integração de fluxos de características diversas e assim conseguir efectuar o correcto dimensionamento de um sistema genérico para o suporte de aplicações de baixo débito. Para testar o desempenho dos vários algoritmos, foram usados quatro tipos de fontes de tráfego a saber:

- Voz – 16kbit/s – débito constante,
- Sensor de temperatura, pressão ou humidade – 800bit/s – débito constante,
- Dados – 16kbit/s – débito variável,
- Painel de interruptores (ou sensores de estado) – 80bit/s – aleatório,
- Vídeo – 80kbit/s – débito variável.

O enquadramento das fontes descritas acima, em aplicações de controlo, foi já abordado na secção 4.1.2. O que importa aqui referir é que, através da definição de cenários concretos em que se usam um conjunto de fontes do tipo das mencionadas acima, será possível carregar o sistema com tráfego de características diversificadas de forma a permitir obter informação acerca da resposta, de cada um dos algoritmos, em termos de atraso e eficiência de multiplexagem.

6.3.1 Geradores de números aleatórios

Normalmente, os processos de simulação requerem a obtenção de amostras provenientes de diferentes distribuições de probabilidade. Este processo é efectuado em duas etapas. Primeiro, obtém-se uma sequência de números aleatórios uniformemente distribuídos num dado intervalo. Depois, a sequência é transformada de modo a produzir valores aleatórios associados à distribuição desejada.

Como geradores de números aleatórios foram testados dois algoritmos do tipo LCG (LCG, *Linear Congruential Generator*) [Ent97] cuja base é:

$$y(n + 1) = [a \cdot y(n) + b] \ (\mathit{mod}\ m)$$ [1]

O primeiro algoritmo é o usado na função rand() do ANSI C [Ker88] e tem os seguintes parâmetros:

$m=2^{31}$ $a=1103515245$ $b=12345$ $y_o=12345$

O segundo algoritmo é conhecido por *minimal standard* e foi sugerido por [Lew69] em 1969 e tem a particularidade de ser um gerador de números aleatórios de período completo, ou seja, ao fim de um número muito elevado de números são gerados todos os valores da sequência. Apesar de ser um algoritmo com alguns anos, tem passado em todos os novos testes de desempenho e demonstrado a sua utilidade em muitos casos. Os seus parâmetros são:

$m=2^{31}-1$ $a=7^5$ $b=0$ $y_o=1$

---

[1] O operador *mod* representa o resto da divisão inteira entre dois números

A Figura 6-7 mostra as Transformadas de Fourier de sequências de 8192 números aleatórios gerados com cada um dos algoritmos. Os gráficos de ambas as transformadas aproximam-se do espectro contínuo do ruído branco, o que permite que qualquer um deles possa ser usado na modelização das fontes de tráfego. No entanto, devido às vantagens e desvantagens referenciadas em [Ent97], optou-se por usar a versão *minimal standard*.

(a)

(b)
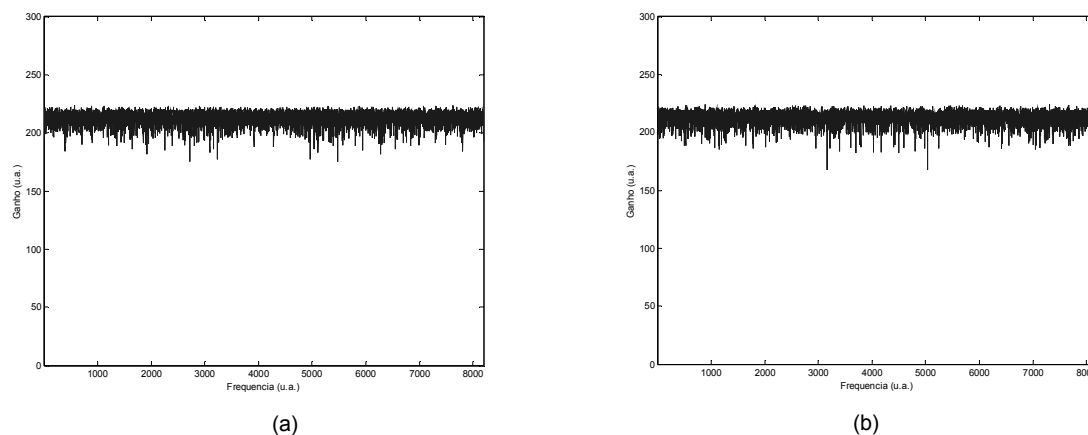
Figura 6-7: Transformada de Fourier de sequências de 8192 números aleatórios gerados por 2 algoritmos: (a) – Função rand() do ANSI C. (b) - *Minimal Standard*. Os valores do ganho e da frequência têm unidades arbitrárias.

6.3.2 Modelização das fontes de tráfego

Em vez de se usarem fontes reais, foram criados modelos de simulação para geração de tráfego de forma a poder criar as situações mais favoráveis ao melhor conhecimento do sistema e assim se poder efectuar o seu dimensionamento duma forma mais exacta.

Para todos os algoritmos geradores de tráfego foi usada a interrupção do relógio de tempo real do sistema operativo que, teoricamente, pode ser programada para funcionar em múltiplos inteiros de 1µs [Set93].

- **Voz**

Gerador de tráfego de débito constante de 16kbit/s. Este gerador coloca na fila de entrada 100 octetos a cada interrupção de 50ms em 50ms.

- **Sensor**

Gerador de tráfego de débito constante a 800bit/s. Para tal, são colocados na fila respectiva 10 octetos a cada interrupção de 100ms em 100ms.

- **Dados**

Gerador de tráfego aleatório com média de 16kbit/s. Para implementar este gerador de tráfego, o número de octetos gerado é fixo e igual a 20 e o instante de tempo é aleatório, seguindo a distribuição de Poisson com média igual a 10ms. Algumas simulações não apresentadas mostraram que o resultado seria idêntico se fosse usado um intervalo de tempo fixo de 100ms e um número de octetos gerado a cada interrupção aleatório, seguindo a distribuição de Poisson com média igual a 20 octetos.

- **Interruptores**

Gerador de trafego aleatório com média igual a 80bit/s. Tal como o anterior, o número de octetos gerado é fixo e igual a 10, enquanto que o instante em que ocorre a interrupção é aleatório, seguindo a distribuição de Poisson com média igual a 1s.

- **Vídeo**

Gerador de tráfego aleatório com média igual a 80kbit/s. O número de octetos gerado a cada interrupção é fixo e igual a 50, enquanto que o instante em que ocorre a interrupção é aleatório, seguindo a distribuição de Poisson com média igual a 5ms.

Para implementar o gerador de tráfego aleatório foi usado um gerador não uniforme que segue a distribuição de Poisson. O algoritmo implementado é descrito em [Pre92]. A Figura 6-8 mostra o histograma do resultado de um gerador de números aleatórios com média 100, seguindo a distribuição de Poisson.
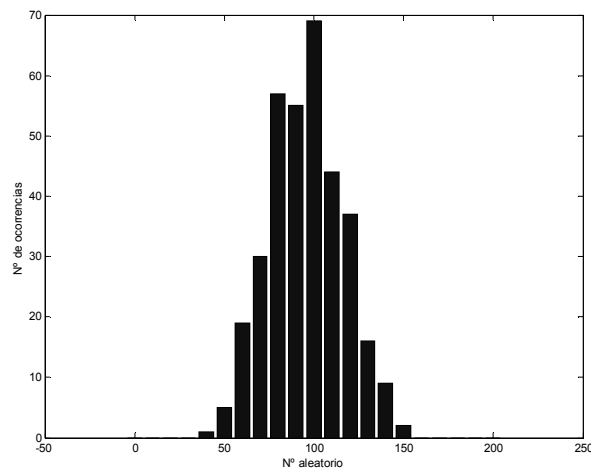
Figura 6-8: Histograma do resultado de um gerador de números aleatórios com média 100 com distribuição de Poisson. Os dados foram agrupados em intervalos de 10 unidades.

Os valores reais da média e da variância são respectivamente 100.01 e 99.433, ou seja, aproximam-se do valor teórico de 100 da distribuição de Poisson.

6.3.3 Critério de paragem da simulação

Para definir o critério de paragem das simulações efectuadas foram observados os instantes de escrita no ficheiro de resultados durante uma simulação com a duração de 60m, usando um algoritmo arbitrário para cada cenário de simulação. Através da observação desses instantes, verificou-se que o número de acessos de escrita ao registo de valores máximos do módulo de Recolha de dados era tanto maior quanto mais próximo se estava do início da simulação. A partir de um dado instante, verificou-se que esse acesso deixava de ser efectuado. Além disso, o intervalo entre instantes consecutivos de escrita aumentava normalmente à medida que se avançava na simulação. No entanto, verificou-se que um dado intervalo entre duas escritas consecutivas era sempre inferior ao dobro do anterior. Deste modo, definiu-se o seguinte critério de paragem:

1. Em cada instante de escrita no registo de valores máximos, calcula-se o valor do instante T_{Fim} correspondente ao dobro do intervalo anterior,

2. Se até ser atingido esse instante (T_{Fim}) houver escritas nesse registo calcula-se um novo valor para T_{Fim} e repete-se o processo,

3. Caso contrário a simulação é terminada.

Foram efectuadas várias simulações de 60m com alguns dos algoritmos descritos em que se comprovou que este critério era suficiente para definir o fim de uma simulação.

6.4 Avaliação dos Algoritmos de escalonamento do Adaptador de terminal

Nesta secção são apresentados os resultados do estudo efectuado para a especificação e avaliação de desempenho dos algoritmos de escalonamento do Adaptador de terminal. Este bloco funcional, pertencente ao módulo de emissão do Adaptador de terminal, é responsável pelo escalonamento dos fluxos de informação recebidos, tendo em conta os requisitos temporais de cada serviço.

6.4.1 Algoritmos básicos

Estes algoritmos destinaram-se avaliar o funcionamento global dos diversos blocos funcionais de modo a ganhar sensibilidade para a definição de outros algoritmos capazes de satisfazer os requisitos de QoS (i.e. atraso) de cada serviço. Qualquer um destes algoritmos não entra em conta com os requisitos de atraso de cada serviço nem com nenhum outro parâmetro relacionado com a QoS.

Foram definidos 4 algoritmos básicos de forma a efectuar o escalonamento da informação proveniente de cada um dos FIFOs associados a cada fonte de tráfego. A descrição desses algoritmos é apresentada na Tabela 6-4.

Tabela 6-4: Descrição dos Algoritmos básicos usados na avaliação do Adaptador de terminal.

Algoritmo	Descrição
Algoritmo 1: **Critério do FIFO mais cheio**	Analisa o tamanho dos diversos FIFOs em cada instante dado pelo *Loopclock*. Atende o FIFO que tem o maior número de octetos.
Algoritmo 2: **Critério do octeto mais antigo**	Lê a amostra temporal do primeiro octeto de cada FIFO ao ritmo do *Loopclock*. Atende o que, em cada instante, tiver o octeto mais antigo.
Algoritmo 3: **Leitura Sequencial**	Atende os FIFOs sequencialmente.
Algoritmo 4: **Leitura Aleatória**	Atende os FIFOs aleatoriamente.

Para efectuar o teste destes algoritmos foi apenas usado o cenário de simulação 1, uma vez que o que interessa avaliar, nestes casos, é o funcionamento básico das diversas funções envolvidas no escalonamento da informação. Deste modo, o cenário 1 permitirá carregar o sistema de forma a retirar informações mais importantes do que o cenário 2 uma vez que é constituído por um conjunto de fontes de tráfego com características mais diversificadas em termos de débito e requisitos de atraso.

Para cada algoritmo foram efectuadas simulações para diferentes valores do *Loopclock*. Como foi referido e se verificará a seguir, o valor deste parâmetro influencia directamente a eficiência de multiplexagem e inversamente o atraso no escalonamento da informação.

Nos parágrafos seguintes são analisados os resultados obtidos para cada um dos algoritmos descritos acima. As quatro primeiras figuras representam a variação do atraso de escalonamento em função do *Loopclock*.
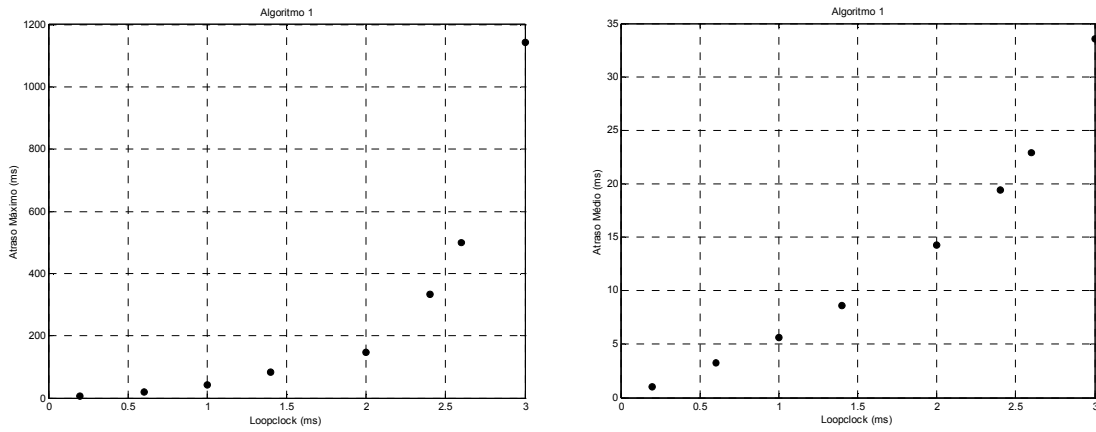
Figura 6-9: Algoritmo 1: Atraso Máximo e Médio em função do *Loopclock*.
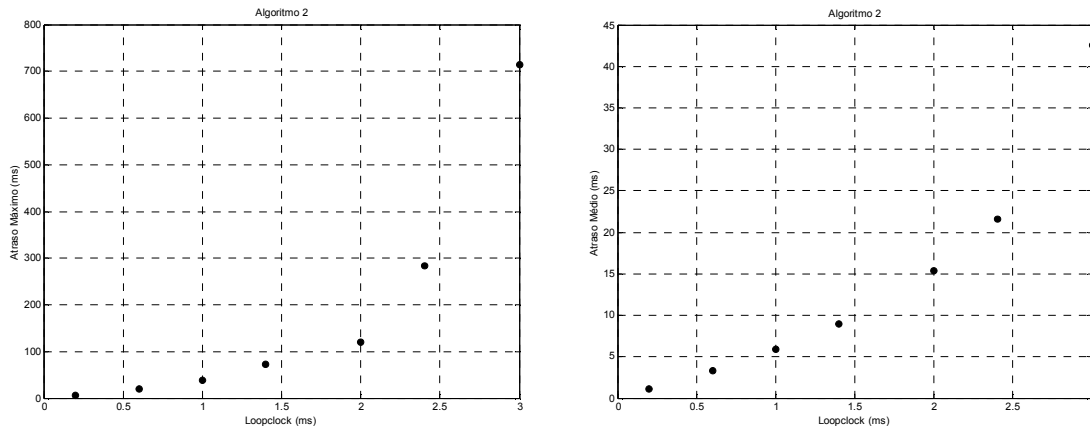
Figura 6-10: Algoritmo 2: Atraso Máximo e Médio em função do *Loopclock*.
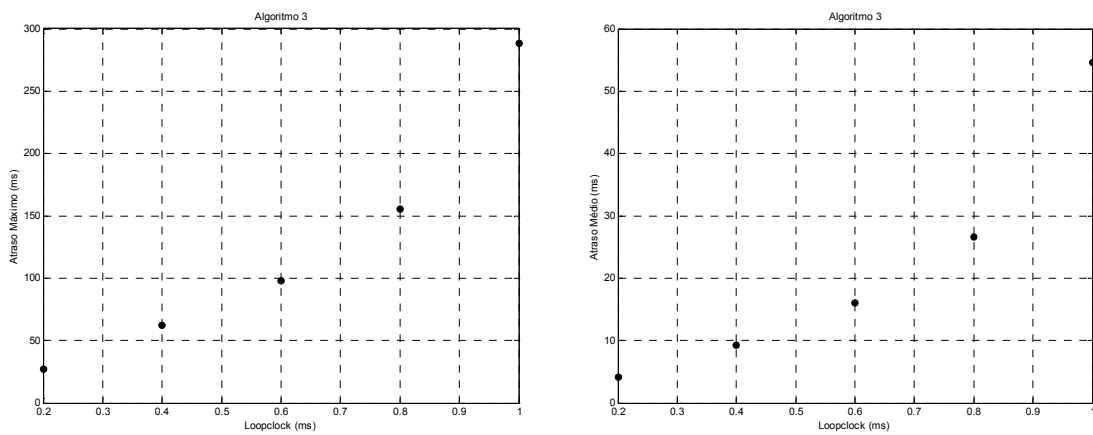
Figura 6-11: Algoritmo 3: Atraso Máximo e Médio em função do *Loopclock*.
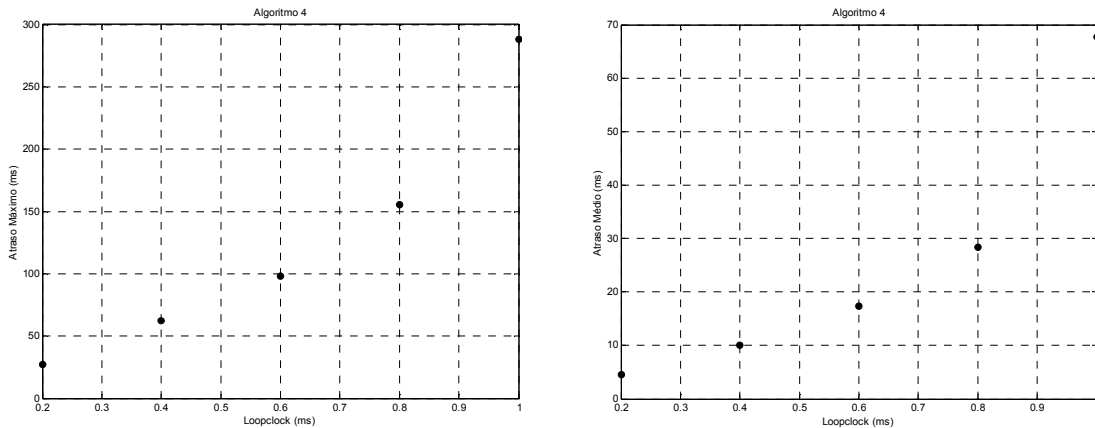
Figura 6-12: Algoritmo 4: Atraso Máximo e Médio em função do *Loopclock*.

Os resultados apresentados nas figuras anteriores representam a variação do atraso máximo e médio em função do *Loopclock*, calculado para todas as fontes de tráfego.

- **Análise dos resultados**

1. Todos os resultados obtidos mostram uma evolução exponencial do atraso em função do valor do *Loopclock*,

2. Os dois primeiros algoritmos revelam um comportamento bastante superior relativamente aos dois últimos. Este facto já era esperado, uma vez que só os dois primeiros se baseiam em parâmetros que influenciam o atraso,

3. Pela mesma razão, os dois últimos algoritmos não conseguem funcionar (ocorre *overflow* nos FIFOs) para valores do *Loopclock* acima de 1ms relativamente aos 3ms dos dois primeiros. Esta limitação implica uma perda na eficiência de multiplexagem dos dois últimos algoritmos relativamente aos dois primeiros,

4. Para valores do *Loopclock* abaixo de 3ms, os dois primeiros algoritmos produzem valores baixos de atraso, sendo o algoritmo 1 ligeiramente melhor,

5. A relação entre o atraso máximo e médio é praticamente constante para valores baixos do *Loopclock* como pode ser observado na Figura 6-13,

6. Através da análise da Figura 6-14 pode ser observado que a eficiência de multiplexagem aumenta directamente com o valor do *Loopclock*. Este facto também era esperado assim como o melhor desempenho do algoritmo 1 relativamente ao 2 para valores acima dos 2ms.
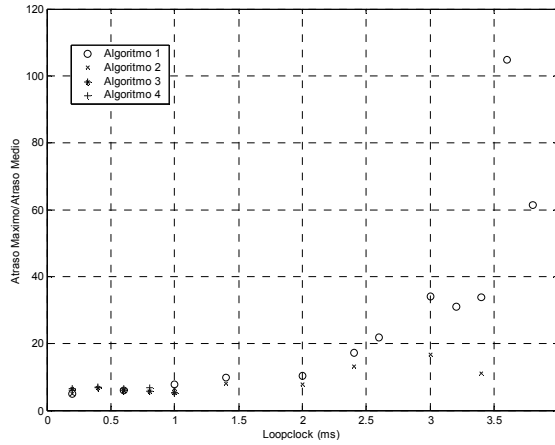
Figura 6-13: Variação do quociente entre o Atraso Máximo e Médio em função do *Loopclock*.
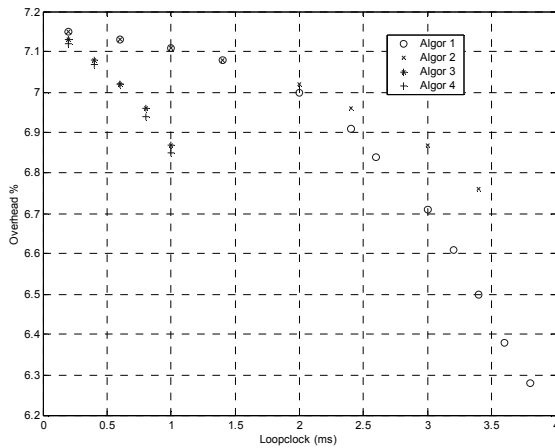
Figura 6-14: Variação do *Overhead* em função do valor do *Loopclock*, para os 4 algoritmos.

- **Conclusões:**

Após a análise atenta dos resultados obtidos é possível retirar as seguintes conclusões:

1. O algoritmo 1 tem um melhor desempenho em termos de eficiência de multiplexagem e atraso. Deste modo, o algoritmo a dimensionar deverá usar o valor do tamanho dos FIFOs como um dos parâmetros principais,

2. A garantia do atraso para um dado serviço é conseguida à custa de um dado valor de *Loopclock*. No entanto, para valores baixos do *Loopclock* a eficiência de multiplexagem diminui devido aos pacotes CPS terem um comprimento menor. Deste modo, o algoritmo a dimensionar deverá permitir estimar o valor do *Loopclock* em função dos parâmetros de tráfego das fontes que garanta a satisfação do atraso máximo de cada fonte e maximize, ao mesmo tempo, a eficiência de multiplexagem.

A partir destas conclusões será apresentado o algoritmo orientado às classes de tráfego, descrito na secção seguinte.

6.4.2 Algoritmo orientado às classes de tráfego

Na secção anterior foram descritos os resultados das simulações de alguns algoritmos básicos que permitiram obter algum conhecimento sobre o comportamento deste módulo em termos de atraso e eficiência de multiplexagem. Através dos resultados obtidos e dos conhecimentos adquiridos foi possível definir um algoritmo que permitirá efectuar o escalonamento da informação proveniente das diversas fontes em função do atraso requerido por cada uma delas.

Os parâmetros associados às classes de tráfego, definidas no capítulo 4, em função das características do serviço a suportar, permitem implementar um mecanismo eficiente de prioridade no atendimento dos FIFOs, associados a cada fonte de tráfego. De acordo com a classe de tráfego, associada a um dado fluxo de informação, um dado algoritmo de escalonamento poderá implementar mecanismos de prioridade no sentido de satisfazer os requisitos de atraso para cada serviço maximizando, simultaneamente, a eficiência no preenchimento dos pacotes CPS.

Assim, para cada fluxo de informação é atribuída uma fila do tipo FIFO e, em cada uma delas, é mantida uma tabela de estado que indicará os seguintes parâmetros:

- Ocupação da fila em octetos,
- Classe de tráfego do fluxo associado,
- Instante temporal do octeto mais antigo na fila (octeto que está “à cabeça” do FIFO),
- Atraso Máximo a garantir – no caso dos fluxos pertencerem às classes AM.

Em função dos parâmetros anteriores, o escalonador usará o seguinte algoritmo:

1. Calcula os instantes de atendimento das filas (*deadlines*), de classe AM, em função dos parâmetros de “Atraso Máximo” respectivos,
2. Enquanto nenhum desses instantes for atingido (*deadline*), atende sequencialmente a fila que tiver maior tamanho (podem ser filas de classes AM ou D),

3. Quando é atingida a *deadline* de uma das filas de classe AM atende a fila correspondente,

4. Se não houver informação nas filas de classe AM ou D, transmite os pacotes das filas das classes EF, de forma sequencial, da maior para a menor.

Deste modo, e de acordo com os resultados obtidos na simulação com os algoritmos básicos, enquanto não são atingidos os instantes de envio dos pacotes da classe AM, o critério de prioridade é baseado na selecção da fila que possuir, num determinado instante, o maior número de octetos. As filas de classe EM só ganham prioridade quando, num dado instante, não existir informação nas filas das restantes classes.

A Figura 6-15 ilustra o mecanismo de escalonamento de tráfego em que é usada a estrutura de multiplexagem dos pacotes CPS da camada AAL-2.
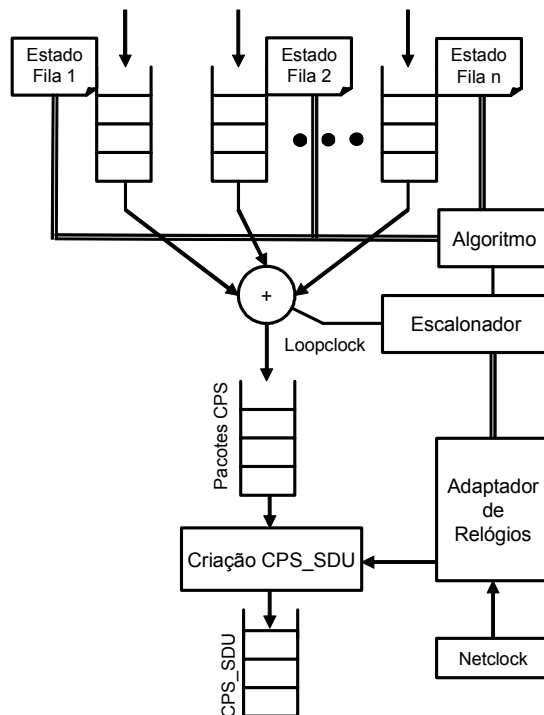
Figura 6-15: Diagrama funcional do mecanismo de escalonamento de tráfego do Adaptador de terminal, em que é usada a estrutura de multiplexagem dos pacotes CPS da camada AAL-2.

Em cada instante, sincronizado pelo *Loopclock*, o escalonador vai tentar ler do FIFO, seleccionado pelo algoritmo de escalonamento, o maior número de octetos possível (45) de modo a preencher um pacote CPS com o número máximo de octetos e assim conseguir a

eficiência máxima. No caso de não existirem octetos em nenhuma fila, o escalonador não formará nenhum pacote CPS e o algoritmo retorna ao ponto de partida.

Uma vez que os fluxos de baixo débito de classe AM podem produzir pouca informação relativamente aos fluxos de outras classes, poderá acontecer que, devido à necessidade de atender estes serviços com alguma prioridade, não seja possível preencher os pacotes com o tamanho máximo. Nestes casos a perda de eficiência de multiplexagem, associada à criação de pacotes mais pequenos, é derivada da necessidade de satisfazer os requisitos de atraso destes serviços.

Avaliação do comportamento do algoritmo com o cenário 1

Para efectuar a avaliação do algoritmo com o cenário 1 será necessário atribuir uma classe de tráfego a cada fluxo de acordo com as características do serviço a suportar. A Tabela 6-5 apresenta uma possível atribuição das classes de tráfego, definidas no capítulo 4, a cada um dos serviços definidos para o cenário 1.

Tabela 6-5: Características de tráfego dos serviços de acordo com o cenário 1. Especificação da classe de tráfego e do atraso máximo associado.

Serviço	Características	Débito médio	Classe de tráfego	Atraso Máximo (ms)
S1	Voz – débito constante	16kbit/s	AM	15
S2	Sensor – débito constante	800bit/s	AM	200
S3	Dados – débito variável	16kbit/s	D	---
S4	Interruptores – débito constante	80bit/s	AM	50
S5	Vídeo – débito variável	80kbit/s	EM	---

Aos serviços de débito constante foram atribuídas classes do tipo AM, uma vez que estes fluxos necessitam que o atraso extremo-a-extremo seja controlado de forma a respeitar a QoS pretendida para o serviço. No caso do fluxo de dados optou-se por se atribuir a classe D, uma vez que esta foi especialmente definida para o suporte deste tipo de tráfego. Finalmente, foi atribuída ao serviço de Vídeo de débito variável a classe EM uma vez que foi definido, para este serviço, que a perda ocasional de informação não seria prejudicial para o desempenho da aplicação (e.g. vigilância).

A última coluna da Tabela 6-5 especifica o atraso máximo que um dado fluxo de informação poderá ter ao “atravessar” o Adaptador de terminal. Este valor corresponde à parcela designada por T1 no modelo de referência da Figura 6-5. Como foi definido, só os serviços da classe AM é

que têm associado este parâmetro. Para as outras classes, como não existem limitações no atraso, o escalonador não impõe nenhum tipo de prioridade relacionado com este parâmetro.

Os valores atribuídos para o Atraso Máximo aos serviços S1, S2 e S4 tiveram por base as características apresentadas na secção 4.1.2, considerando que uma parcela do atraso total seria devida ao Adaptador de terminal. Deste modo, os valores apresentados na Tabela 6-5 representam a parte do atraso total que é imposto ao Adaptador de terminal de acordo com o que foi explicado na secção 6.2. Além disso, estes valores são apenas indicativos para efectuar o teste do algoritmo, o que pode significar que, na prática, estes valores possam ser menos restritivos.

Os resultados dos testes efectuados com este cenário de simulação são apresentados na Tabela 6-6. Os valores representados na tabela correspondem aos atrasos máximos de cada serviço assim como os valores máximos dos níveis dos FIFOs associados a cada fluxo de informação. Como valor indicativo da eficiência de multiplexagem é indicado, na última coluna, o tamanho médio dos pacotes CPS.

Tabela 6-6: Resultados da avaliação do algoritmo de escalonamento, orientado às classes de tráfego, usando o cenário 1.

	Atraso máximo (ms)					**Tamanho máximo do FIFO (nº de octetos)**					
Loopclock (ms)	**D1**	**D2**	**D3**	**D4**	**D5**	**F1**	**F2**	**F3**	**F4**	**F5**	**CPS**
0,2	0,8	0,2	1,6	0,2	3,4	100	10	200	10	500	39,01
0,6	2,4	0,6	5,4	0,6	12,6	100	10	200	10	640	39,01
1,0	4,2	1,0	9,0	1,0	21,9	100	10	200	10	820	39,10
1,4	6,9	1,4	12,5	1,4	33,6	100	10	200	10	955	39,11
1,8	8,9	1,8	16,2	1,8	56,1	100	10	265	10	1005	39,11
2,2	9,4	2,2	19,8	2,2	105,4	100	10	310	10	1580	39,13
2,4	9,8	2,4	21,4	2,4	151,7	100	10	310	10	2120	39,15
3,0	14,8	3,0	29,9	3,0	632,4	100	10	355	10	5365	39,17

Cada linha da tabela corresponde a uma simulação para um determinado valor do *Loopclock*. Foram apenas apresentados os valores abaixo do valor indicativo da equação 6-3 (i.e. 3,19ms) Acima deste, os valores obtidos do atraso e tamanho dos FIFOs não satisfazem os objectivos pretendidos.

- **Análise dos resultados**

Através da análise da tabela de resultados podemos observar o seguinte:

1. O algoritmo apresenta uma boa resposta aos serviços de classe AM, conforme se pretendia aquando o seu dimensionamento,

2. A satisfação dos requisitos de atraso para serviços de muito baixo débito, quando multiplexados com outros, de débitos de ordem de grandeza superior, é garantida à partida (o atraso é praticamente igual ao valor do *Loopclock*),

3. Os pacotes CPS correspondentes aos serviços S2 e S4 têm um tamanho bastante pequeno (i.e. entre 1 a 10 octetos). Este facto deve-se à necessidade de escalonar as filas correspondentes de modo a poder cumprir o valor do parâmetro AM,

4. O serviço que impõe mais restrições ao sistema é o S1 porque é o serviço de classe AM com maior peso (14,17%),

5. Como era pretendido, verifica-se que o serviço S1 é, também, o que impõe mais prioridade ao escalonador de forma a tentar cumprir o atraso máximo pretendido. Isso é observado através do tamanho de F1 que, dentro da gama de valores apresentada na tabela, é constante (100 octetos). Ao não haver acumulação de informação no FIFO significa que, para esta gama de valores, o valor do atraso está relacionado directamente com o valor do *Loopclock*, como ilustra a Figura 6-16,
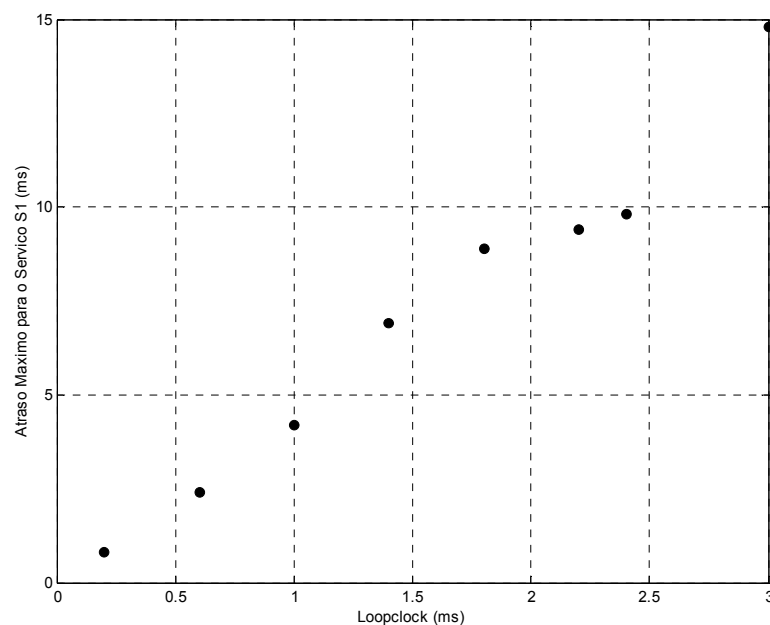
Figura 6-16: Variação do Atraso máximo em função do *Loopclock* para o serviço S1.

6. Os resultados obtidos mostram que os requisitos de atraso são satisfeitos para todos os serviços,

7. O serviço S5, embora tenha um peso elevado (70,87%) e seja do tipo EM, é multiplexado duma forma eficiente pelo escalonador, contribuindo fortemente para uma boa taxa de ocupação média de pacotes CPS. O tamanho médio dos pacotes obtido foi de 39 octetos o que corresponde a cerca de 7,7% de *overhead*,

8. O serviço S5, por ter a mais baixa prioridade, apresenta valores do nível do FIFO relacionados directamente com o valor do *Loopclock*, como ilustra a Figura 6-17.
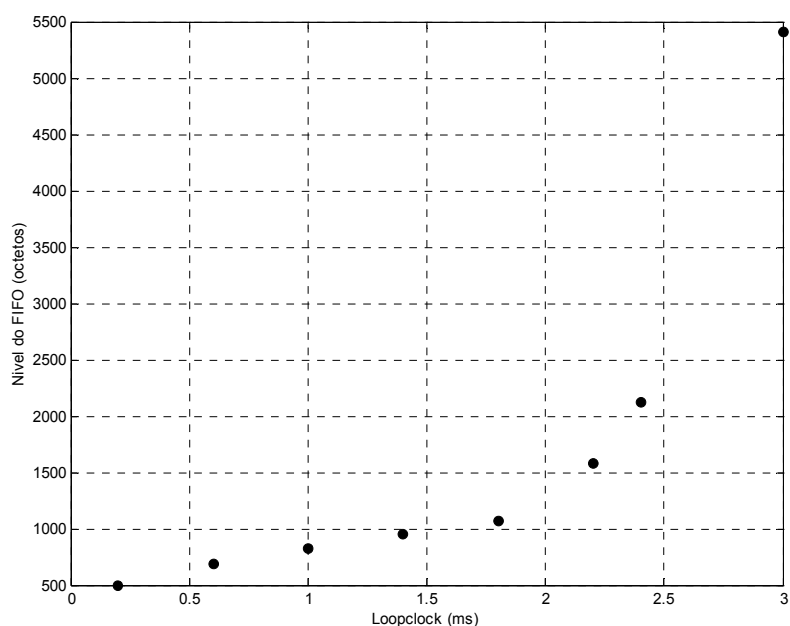
Figura 6-17: Variação do nível do FIFO em função do *Loopclock* para o serviço S5.

- **Conclusões**

1. Este cenário de simulação permite concluir que o escalonador consegue ter um bom desempenho. Consegue satisfazer os requisitos de atraso dos serviços de classe AM assim como garantir uma boa eficiência na multiplexagem de serviços com características diferentes em termos de débito e requisitos temporais,

2. No caso em que uma das fontes geradoras de tráfego de classe AM imponha ao sistema um valor para o seu atraso máximo duma ordem de grandeza próxima do valor indicativo da equação 6-3 (e.g. S1 – ver Figura 6-16), haverá uma degradação da eficiência de multiplexagem, uma vez que o valor da frequência do *Loopclock* terá de ser mais elevada para conseguir cumprir esse requisito,

3. A desvantagem apontada no parágrafo anterior será minimizada quando o sistema suporta um número elevado de fontes e em que o valor indicativo da equação 6-3 é sempre de ordem de grandeza bastante inferior ao do atraso máximo de qualquer uma das fontes de entrada.

Avaliação do comportamento do algoritmo com o cenário 2

Como foi referido na secção 6.1.1, este cenário de simulação destina-se a avaliar o comportamento dos algoritmos de escalonamento em função do número de fontes de tráfego.

Em aplicações de baixo débito as fontes que existirão com mais predominância são as do tipo Sensor e Dados. Deste modo, será conveniente analisar o comportamento dos algoritmos em função do número de fontes de cada um destes tipos. Assim, foram simuladas duas variantes deste cenário, em que a primeira se destina a avaliar o efeito do aumento do número de fontes do tipo Dados, enquanto que a segunda avalia o efeito do aumento do número de fontes do tipo Sensor. A Tabela 6-7 apresenta a caracterização das fontes de tráfego usadas no cenário 2.

Tabela 6-7: Características de tráfego das fontes de acordo com o cenário 2. Especificação do atraso máximo e classe de tráfego associada.

Serviço	Características	Débito médio	Classe de tráfego	Atraso Máximo (ms)
S2	Sensor – débito constante	800bit/s	AM	200
S3	Dados – débito variável	16kbit/s	D	---

As características de tráfego apresentadas na Tabela 6-7 mantêm a coerência com os pressupostos apresentados na secção 6.3, em que o parâmetro de Atraso Máximo associado à fonte do tipo Sensor é o mesmo do usado no cenário 1.

- **Análise de resultados**

A primeira variante deste cenário pretende avaliar o comportamento do algoritmo à medida que se vão introduzindo fontes do tipo Dados. Assim, partiu-se de uma situação com o mesmo número de fontes do tipo Sensor e Dados (i.e. 5 de cada) e, posteriormente, foram-se acrescentando, em cada simulação, mais 5 fontes de cada vez. Na Tabela 6-8 (Variante A) estão registados os valores obtidos para os atrasos máximos de cada tipo de fluxo, o tamanho máximo dos FIFOs, associados a cada fluxo, o tamanho médio dos pacotes CPS, assim como os valores indicativos ($Loopclock_{max}$) e simulados ($Loopclock_{sim}$) do *Loopclock*.

Tabela 6-8: Resultados da avaliação do algoritmo orientado às classes de tráfego usando o cenário 2 (Variante A).

Nº S3	$Loopclock_{Max}$ (ms)	$Loopclock_{Sim}$ (ms)	D2 (ms)	D3 (ms)	F2 (octetos)	F3 (octetos)	CPS (octetos)
5	4,286	4,1	20,5	2054	10	3575	35,65
10	2,195	2	10,5	1047	10	1985	41,11
15	1,475	1,4	7,0	691	10	1365	43,67
20	1,111	1,1	5,5	964	10	1805	45,17

A segunda variante consiste em efectuar um procedimento semelhante. Começa-se por simular o algoritmo com o mesmo número de fontes de cada tipo (i.e. 5 de cada), em que agora se acrescentam, de cada vez, 5 fontes do tipo Sensor. Os resultados obtidos (Variante B) são apresentados na Tabela 6-9, seguindo a mesma lógica dos apresentados na Variante A.

Tabela 6-9: Resultados da avaliação do algoritmo orientado às classes de tráfego usando o cenário 2 (Variante B).

Nº S2	$Loopclock_{Max}$ (ms)	$Loopclock_{Sim}$ (ms)	D2 (ms)	D3 (ms)	F2 (octetos)	F3 (octetos)	CPS (octetos)
5	4,286	4,1	20,5	2054	10	3575	35,65
10	4,091	3,9	39	5251	10	7375	32,21
15	3,913	2,4	36	311	10	740	21,32
20	3,750	1,6	32	122	10	510	19,53

1. No caso da Variante A verifica-se que o aumento do número de fontes do tipo Dados melhora o desempenho do algoritmo, uma vez que aumenta o tamanho médio dos pacotes CPS (i.e. diminui o *overhead*) assim como diminui o atraso associado a cada fonte,

2. No caso da Variante B verifica-se um fenómeno inverso, ou seja, a introdução de fontes do tipo Sensor diminui o desempenho do algoritmo, em termos de eficiência de multiplexagem, uma vez que é necessário processar pacotes com tamanhos menores de modo a cumprir os requisitos de atraso destas fontes,

3. Em qualquer uma das variantes, o algoritmo consegue cumprir os atrasos estabelecidos para as fontes do tipo Sensor (200ms). Na prática, verifica-se que este valor é menos restritivo, uma vez que poderão existir fontes deste tipo com valores de Atraso Máximo bastante superior. Para fundamentar este pressuposto efectuou-se a

simulação com as características indicadas na Tabela 6-7, em que apenas se alterou o valor do Atraso Máximo, associado às fontes do tipo Sensor, para 2,5s. Os resultados são apresentados na Tabela 6-10.

Tabela 6-10: Resultados da avaliação do algoritmo orientado às classes de tráfego usando o cenário 2 (Variante B - modificado).

Nº S2	**$Loopclock_{Max}$ (ms)**	**$Loopclock_{Sim}$ (ms)**	**D2 (ms)**	**D3 (ms)**	**F2 (octetos)**	**F3 (octetos)**	**CPS (octetos)**
5	4,286	4,1	221	534	30	1145	37,12
10	4,091	3,9	236	644	30	1320	29,63
15	3,913	2,4	235	145	30	465	23,78
20	3,750	1,6	177	86	20	375	21,17

4. Ao aumentar o valor do Atraso Máximo para as fontes do tipo Sensor, verificou-se um ligeiro aumento da eficiência de multiplexagem, uma vez que o escalonador consegue reter octetos do tipo AM nos FIFOs durante mais tempo e assim conseguir criar pacotes com tamanhos maiores,

5. É também possível prever que, se os débitos das fontes do tipo Sensor forem da mesma ordem de grandeza das do tipo Dados, a eficiência também iria aumentar, pelas mesmas razões apontadas no parágrafo anterior.

- **Conclusões**

1. Este cenário de simulação permite concluir que o escalonador consegue ter um bom desempenho em termos de cumprimento do atraso dos serviços de classe AM,

2. A eficiência de multiplexagem é sempre dependente das características de tráfego das fontes que se apresentam à entrada do Adaptador de terminal,

3. Quanto menor for a quantidade de fontes do tipo AM e menos apertados forem os requisitos de atraso destas, melhor será o desempenho do algoritmo em termos de eficiência de multiplexagem,

4. Em qualquer dos cenários verificou-se que o algoritmo proposto para o escalonador consegue cumprir os requisitos de atraso impostos, à entrada, pelas fontes de classe AM.

6.5 Avaliação dos Algoritmos de escalonamento do Concentrador

Nesta secção são apresentados os resultados do estudo efectuado para a especificação e avaliação de desempenho dos algoritmos de escalonamento do Concentrador. Este bloco funcional, pertencente ao módulo de concentração do Concentrador, é responsável pelo escalonamento dos fluxos de pacotes CPS recebidos, tendo como objectivo aumentar a eficiência de multiplexagem final sem degradar significativamente a QoS dos diversos fluxos de informação transportados.

Como foi referido na secção 6.1.2, este módulo recebe, em cada porta de entrada, um fluxo de pacotes CPS, associado aos fluxos de entrada de cada Adaptador de terminal. Cada pacote CPS, além da informação útil que transporta, tem associado um cabeçalho que identifica, entre outros, a classe de tráfego (UUI) e o tamanho do pacote (LI). Uma vez que se torna complexo implementar um mecanismo que entre em conta com o Atraso Máximo associado aos fluxos de classe AM, o critério de prioridade, implementado pelo Algoritmo de escalonamento, terá de minimizar o tempo de atendimento dos pacotes desta classe além de promover uma maior eficiência de multiplexagem e assim economizar os custos de transmissão relacionados com a largura de banda utilizada. Deste modo, podem ser implementados algoritmos de escalonamento utilizando diversas abordagens:

- **1ª abordagem**

Os pacotes que chegam a cada porta são colocados em FIFOs. Seguidamente, é calculada uma média deslizante de chegada de pacotes por FIFO. O algoritmo atende os FIFOs com uma prioridade baseada na média deslizante calculada anteriormente.

- **2ª abordagem**

Os pacotes que chegam a cada porta são colocados numa memória de acesso aleatório (RAM, *Random Access Memory*). O algoritmo atende, por ordem de chegada, os pacotes de classe AM, em seguida os da classe D e, finalmente, os da classe EM.

- **3ª abordagem**

Os pacotes que chegam a cada porta são encaminhados para 3 filas, de acordo com a sua classe de tráfego. O algoritmo atende, em primeiro lugar as filas de pacotes de classe AM, em seguida os da classe D e, finalmente, os da classe EM.

Qualquer uma destas abordagens maximiza a ocupação da largura de banda, uma vez que o princípio de funcionamento do Concentrador o garante à partida.

A 1ª abordagem caracteriza-se por implementar um mecanismo de prioridade baseada no tamanho dos FIFOs. Embora este critério tivesse demonstrado um desempenho razoável nas simulações efectuadas com os algoritmos básicos do Adaptador de terminal (secção 6.4.1), não dá prioridade ao tráfego de classe AM e, desse modo, não garante a optimização do atraso para estes serviços. Por outro lado, o cálculo da média deslizante introduz complexidade na implementação deste algoritmo. A 2ª abordagem resolve o problema da prioridade relacionada com o tráfego de classe AM à custa da introdução de mecanismos de gestão de memória mais complexos. Na 3ª abordagem é implementada uma solução semelhante à anterior em que cada pacote, ao chegar a uma das portas do Concentrador, é encaminhado para uma fila específica em função da classe de tráfego que o pacote transporta. Deste modo, à custa da introdução de um pequeno atraso, consegue-se implementar um mecanismo que atende prioritariamente os pacotes de classe AM e assim minimize o atraso dos serviços associados a estas classes. A Figura 6-18 ilustra o mecanismo usado para o escalonamento de tráfego no Concentrador.
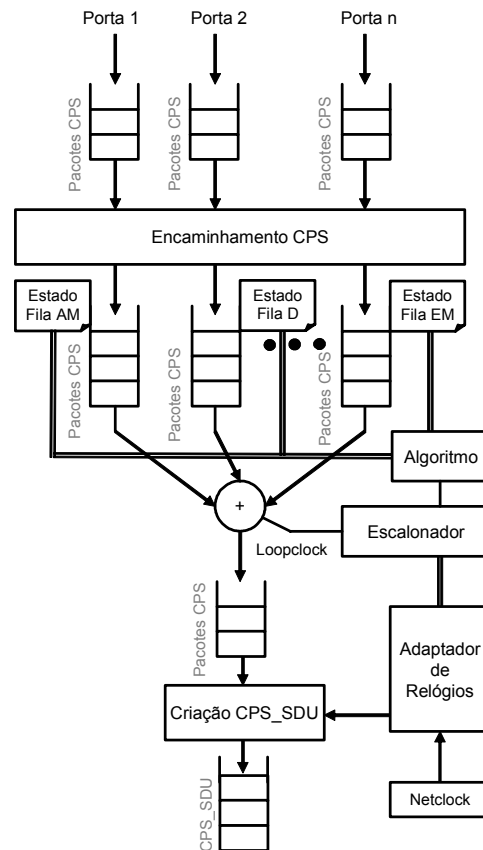
Figura 6-18: Diagrama funcional do mecanismo de escalonamento de tráfego do Concentrador, em que é usada a estrutura de multiplexagem dos pacotes CPS da camada AAL-2.

A estrutura funcional deste módulo é basicamente idêntica à da usada para o Adaptador de terminal. Este algoritmo implementa um mecanismo de prioridade mais simples uma vez que não tem de calcular os tempos de envio dos pacotes de classe AM. Por outro lado, neste algoritmo é necessário processar os campos LI, de cada pacote, de forma a determinar o seu comprimento. Assim, o escalonador usará o seguinte algoritmo:

1. Em cada instante dado pelo *Loopclock*, processa os pacotes das filas de classe AM,
2. Caso não existam pacotes nas filas AM, processa os pacotes das filas D,
3. Caso não existam pacotes nas filas D, processa os pacotes das filas EM.

Devido ao efeito de concentração, poderá ocorrer o fenómeno de *overflow* no FIFO de pacotes da classe EM, uma vez que estes têm prioridade mínima de atendimento. Nestas situações, o algoritmo limita-se apenas a rejeitar os pacotes que excedam a capacidade do FIFO. De referir que esta classe de serviço foi definida (secção 4.1.3) para serviços que podem sofrer perdas ocasionais de informação.

Avaliação do algoritmo do Concentrador

Para efectuar a avaliação de desempenho do algoritmo proposto anteriormente, efectuou-se a simulação baseada no sistema de testes descrito na secção 6.1.2. Para cada gerador de pacotes será necessário definir as seguintes entradas:

- Intervalo médio entre pacotes CPS,
- Tamanho médio do pacote CPS.

A partir destes valores é possível relacionar o débito médio produzido por cada fonte, ou seja, por cada Adaptador de terminal:

$$DébitoMédio = \frac{Tamanho\ médio\ de\ pacote\ CPS}{Intervalo\ médio\ entre\ pacotes\ CPS} \tag{6-6}$$

Usando para o Tamanho médio de pacote CPS o valor de 39, obtido a partir dos resultados da simulação com o cenário 1 de avaliação do Adaptador de terminal (Tabela 6-6), efectuaram-se simulações, caracterizadas por se considerar, à entrada de cada porta do Concentrador, um débito médio aproximadamente igual ao produzido pelas fontes descritas no mesmo cenário, ou seja, 113kbit/s.

O valor do *Loopclock* é calculado a partir da equação 6-4. Como existem 8 portas, então o valor do *Loopclock* será de:

$$Loopclock = \frac{39 \times 8}{8 \times 113000} \approx 0{,}345 ms \quad (6\text{-}7)$$

No caso do Concentrador, um valor baixo do *Loopclock* não conduz à perda de eficiência, uma vez que o tamanho dos pacotes CPS não é alterado, ao contrário do Adaptador de terminal, em que a escolha do valor do *Loopclock* é baseada numa solução de compromisso entre a minimização do atraso e a optimização da eficiência de multiplexagem.

Quanto mais baixo é o valor do *Loopclock* menor será o atraso global sofrido por cada pacote, uma vez que a velocidade de processamento aumenta. Por outro lado, quanto menor for a quantidade de pacotes AM, que entram no Concentrador, relativamente aos pacotes das outras classes, menor será o seu tempo de espera no escalonador.

Assim, interessa avaliar o comportamento em função da percentagem total de pacotes AM que entram no Concentrador. A Tabela 6-11 apresenta os resultados obtidos na simulação do Algoritmo de escalonamento do Concentrador para diferentes valores da percentagem de pacotes AM relativamente às outras duas classes.

Tabela 6-11: Resultados da avaliação do Algoritmo de escalonamento do Concentrador.

Fontes AM (%)	**$Atraso_{AM}$ (ms)**	**$Atraso_{D}$ (ms)**	**$Atraso_{EM}$ (ms)**	**$FIFO_{AM}$ (octetos)**	**$FIFO_{D}$ (octetos)**	**$FIFO_{EM}$ (octetos)**
20	0,34	0,69	1,95	48	48	135
40	0,34	0,71	2,30	48	48	131
60	0,34	1,17	3,35	48	48	90
80	0,46	3,04	9,36	93	48	129
100	27,7	0	0	351	0	0

As simulações efectuadas usaram um *Loopclock* cujo valor é aproximadamente igual à soma dos valores médios dos débitos de entrada das portas do concentrador. Deste modo, não haverá perda de pacotes devido ao efeito de concentração. A partir de um valor do *Loopclock* acima do calculado na equação 6-7 a fila de pacotes de classe EM começará a crescer, até ocorrer *overflow*, com a consequente perda de pacotes desta classe. A perda de pacotes EM estará relacionada com a diferença entre a soma dos débitos médios de entrada e o débito de saída.

- **Análise de resultados**

1. Verifica-se, através da observação da Tabela 6-11, que o atraso introduzido pelo Concentrador é bastante reduzido para as fontes de classe AM, excepto quando não existem fontes de outro tipo,

2. O atraso introduzido depende de dois factores: disciplina de escalonamento implementada pelo algoritmo e o valor do *Loopclock*.

3. Os pressupostos que conduziram à especificação do Algoritmo de escalonamento do Concentrador foram totalmente satisfeitos na prática, verificando-se uma boa resposta à satisfação dos requisitos de atraso das diversas fontes de tráfego.

- **Conclusões**

1. Como era de prever, verificou-se que o Algoritmo de escalonamento do Concentrador cumpre, com relativa facilidade, o objectivo de satisfazer os requisitos de atraso dos fluxos associados às fontes de classe AM,

2. A prioridade dada aos fluxos de classe AM reflecte-se na introdução de um maior atraso aos fluxos das outras duas classes. Esse atraso é sempre maior nos fluxos de classe EM e depende essencialmente do nível de concentração e da largura de banda da porta de saída do concentrador,

3. Em termos de eficiência de multiplexagem será sempre conveniente a utilização de um Concentrador uma vez que a largura de banda, associada aos fluxos agregados dos Adaptadores de terminal, pode não estar totalmente ocupada. Esta particularidade foi já ilustrada na Figura 5-9,

4. Os valores absolutos dos atrasos dos vários fluxos estão directamente relacionados com o débito do tráfego agregado de saída. Deste modo, o desempenho do Concentrador, em termos de atraso, é condicionado pelo número de fontes e seus débitos médios e quantidade de Adaptadores de terminal utilizados,

5. No caso do nível de concentração ser tal que implique a perda de pacotes, os fluxos de classe EM serão afectados. Neste caso, a Aplicação de controlo terá de possuir mecanismos que permitam lidar com esta situação.

6.6 Avaliação global da solução proposta

As secções anteriores apresentaram o estudo efectuado para a avaliação dos Algoritmos de escalonamento do Adaptador de terminal e do Concentrador. Os resultados obtidos foram baseados na simulação destes módulos, usando um sistema de testes que consiste num conjunto de modelos simplificados dos módulos apresentados no capítulo 5.

Na secção 6.2 foi apresentada uma configuração de referência que permitiu evidenciar os atrasos de transmissão parciais ao longo dos vários segmentos de rede, entre os quais os do Adaptador de terminal e do Concentrador. Através desta separação, foi possível testar os vários Algoritmos de escalonamento em função da parcela de atraso atribuída a cada um destes módulos.

Os testes efectuados ao Adaptador de terminal foram baseados em dois cenários concretos destinados a avaliar, respectivamente, a capacidade de integração de fluxos de informação associados a serviços com requisitos de atraso diferentes, e a capacidade do sistema suportar um elevado número de fluxos de baixo débito duma forma eficiente.

Os resultados obtidos evidenciaram um bom desempenho do Algoritmo de escalonamento proposto, quer em termos do cumprimento dos atrasos impostos pelas fontes de entrada, quer em termos de eficiência de multiplexagem. Através da análise dos resultados é possível definir um conjunto de regras que permitem garantir um desempenho elevado do Algoritmo de escalonamento do Adaptador de terminal:

1. A utilização de um número elevado de fontes que não imponham requisitos temporais melhora o desempenho em termos de eficiência de multiplexagem,

2. O desempenho do escalonador em termos de satisfação dos atrasos parciais das fontes de tráfego de classe AM está sempre condicionado às características das fontes que estão envolvidas numa dada aplicação. Com o cenário 1 verificou-se que, se as fontes de classe AM tiverem um peso baixo em termos de débito médio total, o Algoritmo consegue cumprir facilmente o atraso imposto à entrada,

3. O cenário 1 permitiu também constatar que o escalonador consegue suportar eficazmente a integração de serviços com características diversas o que permite concluir que, sempre que possível, é desejável integrar, numa aplicação de controlo, serviços de débitos mais elevados e sem requisitos temporais com outros, de débito mais baixo com requisitos de atraso mais apertados,

4. O cenário 2 permitiu constatar o contrário, ou seja, haverá uma degradação da eficiência de multiplexagem à medida que o número de fontes de classe AM aumenta relativamente ao número de fontes das outras classes.

A avaliação efectuada foi baseada no modelo simplificado de testes desenvolvido para o efeito [Cab05]. As simplificações assumidas na especificação do sistema de testes permitiram tornar mais fácil a obtenção de resultados em relação a um sistema real e, ao mesmo tempo, definir modelos de fontes artificiais que permitiram também a criação de cenários específicos de teste, difíceis de conseguir com fontes reais.

Deste modo, é possível concluir que o desempenho do Algoritmo de escalonamento do Adaptador de terminal satisfaz os requisitos para os quais foi dimensionado, permitindo validar a especificação deste módulo, apresentada no capítulo 5.

Para a avaliação do Concentrador, utilizou-se um cenário em que são gerados pacotes CPS de tamanho variável, em cada porta de entrada. São medidos os atrasos máximos dos fluxos das diversas classes de tráfego, assim como os tamanhos das filas correspondentes.

Em termos de complexidade, este algoritmo, é bastante mais simples que o desenvolvido para o Adaptador de terminal, uma vez que não usa o parâmetro “Atraso Máximo” associado aos fluxos de classe AM. Deste modo, os testes efectuados basearam-se em avaliar a variação dos atrasos dos fluxos das diferentes classes em função da percentagem de pacotes da classe AM, gerados à entrada do Concentrador.

Os resultados obtidos permitem comprovar o que já se esperava, ou seja, a melhoria da eficiência global de multiplexagem.

Em relação ao atraso, verificou-se que depende do valor do débito de saída do Concentrador, desde que as fontes de tráfego não sejam maioritariamente de classe AM. Deste modo, o atraso introduzido pelo Concentrador a fluxos de classe AM, com o cenário descrito, é bastante reduzido (≈0,4ms) face ao Atraso Máximo especificado (200ms), para um débito de saída inferior a 1Mbit/s (i.e. 8 X 113kbit/s).

Perante os resultados obtidos é possível concluir que a introdução de um Concentrador, numa arquitectura de controlo com vários Adaptadores de terminal, é bastante vantajosa, uma vez que permite agregar ainda mais o tráfego, proveniente dos diversos Adaptadores de terminal, reduzindo os custos associados ao tráfego contratado a um operador de telecomunicações da rede de suporte, à custa da introdução de um atraso pouco significativo.

Por estes motivos, é possível igualmente constatar um bom desempenho do Algoritmo de escalonamento do Concentrador, permitindo assim validar a especificação deste módulo, apresentada no capítulo 5.

Síntese

Neste capítulo foi efectuada a análise de desempenho do sistema proposto para adaptação de tráfego baixo débito, resultante da interligação remota de dispositivos sensores e actuadores, através de uma infra-estrutura baseada numa rede de comunicação (pública ou de área local) com capacidade de transportar, de uma forma transparente, células ATM.

Foi apresentado o ambiente através do qual se efectuou a análise de desempenho aos vários módulos desenvolvidos do Adaptador de terminal e do Concentrador. Na sequência da análise dos resultados obtidos por simulação foram especificados Algoritmos de escalonamento para agregação dos vários fluxos de informação à entrada do Adaptador de terminal e do Concentrador.

Da análise de desempenho desses algoritmos resulta a verificação da utilização eficiente da largura de banda disponível, evidenciando que a solução proposta para adaptação de tráfego de baixo débito em aplicações de controlo é capaz de assegurar eficazmente os objectivos pretendidos.

7

Conclusões

Ao estudar a adaptação de tráfego de baixo débito em aplicações de controlo, foi possível identificar várias limitações dos actuais sistemas de aquisição de dados, designadamente ao nível dos débitos, capacidades de endereçamento e área de cobertura.

A adaptação de serviços de muito baixo débito tem subjacente o controlo do atraso no preenchimento dos pacotes e o respectivo escalonamento, aspectos que têm um impacto significativo na Qualidade de Serviço.

Em resposta a estes problemas, foi proposta e especificada uma arquitectura modular de um sistema que permite multiplexar vários fluxos de informação, gerados por serviços de muito baixo débito, num único fluxo agregado. Foi seleccionada para o efeito a tecnologia ATM, pelas propriedades que apresenta no que se refere à eficiência de multiplexagem e ao controlo do atraso de empacotamento.

O Modo de Transferência Assíncrono, além de permitir multiplexar um número muito elevado de fontes de tráfego, garante a QoS negociada no estabelecimento ou durante a fase activa das ligações.

A capacidade de multiplexar um elevado número de fontes de tráfego de baixo débito pode ser assegurada, nomeadamente, pelo protocolo da camada de adaptação AAL-2. Por outro lado, a capacidade de endereçamento, oferecida pela camada ATM, permite identificar um número de elementos terminais, como sensores ou actuadores, incomparavelmente maior do que o suportado pelos actuais sistemas de aquisição de dados e controlo, geralmente utilizados em ambientes industriais. A capacidade da rede ATM para suportar este tipo de tráfego permitirá,

além da possibilidade de integrar diferentes tipos de sistemas e equipamentos, o aparecimento de novas aplicações, assim como a inclusão de novas funcionalidades noutras aplicações que apresentam, actualmente, desempenhos significativamente limitados.

Além disso, a utilização das redes públicas de telecomunicações, para interligar remotamente unidades sensoras e actuadoras, permitirá alargar a área de cobertura dos actuais sistemas de aquisição de dados e controlo. Ao oferecer maiores capacidades de transmissão e atrasos controláveis, as redes ATM, permitem igualmente integrar tráfego de fluxos de baixo débito com os gerados por outro tipo de serviços.

A arquitectura proposta, inclui uma aplicação de controlo remoto para interligar, através de uma rede ATM, os diversos dispositivos através de dois módulos fundamentais: o Adaptador de terminal e o Concentrador. O primeiro destina-se a efectuar a ligação directa ou indirecta dos sensores e / ou actuadores, enquanto que o segundo permite interligar os vários Adaptadores de terminal, efectuando um espécie de multiplexagem de segunda ordem.

Para efectuar a agregação de tráfego foram desenvolvidos Algoritmos de escalonamento temporal para o Adaptador de terminal e Concentrador, de forma a satisfazer dois objectivos principais: garantir o cumprimento do atraso de serviços com restrições temporais e aumentar a eficiência de transmissão na rede.

Para analisar o desempenho da solução proposta e dimensionar os módulos necessários ao suporte de aplicações, foram caracterizadas diversas fontes geradoras de tráfego e definida uma estrutura de multiplexagem capaz de suportar o transporte eficiente da informação das diversas fontes de tráfego, em função da qualidade exigida pelo serviço.

Tornou-se igualmente necessário criar modelos computacionais para simular o comportamento do sistema proposto e avaliar a eficiência dos vários Algoritmos de escalonamento temporal usados no Adaptador de terminal e no Concentrador. A análise de desempenho foi baseada num sistema simplificado, implementado por um conjunto de programas em linguagem C que permitiram avaliar, duma forma objectiva, os Algoritmos de escalonamento de tráfego propostos.

Os resultados obtidos permitem concluir que o uso do protocolo AAL-2, como estrutura de suporte à multiplexagem, faz uma utilização eficiente da largura de banda.

Os testes efectuados ao Adaptador de terminal revelaram um bom desempenho em termos de capacidade de integração de fluxos de informação associados a serviços com requisitos de atraso diferentes, e a capacidade do sistema suportar um elevado número de fluxos de baixo débito duma forma eficiente.

Em relação ao concentrador, verificou-se que, embora o Algoritmo de escalonamento seja mais simples, é igualmente eficaz na melhoria da eficiência global de multiplexagem.

Deste modo, verifica-se experimentalmente ser possível interligar remotamente diferentes sistemas de aquisição de dados e controlo, com garantias de satisfação da Qualidade de Serviço requerida pelas aplicações, através da arquitectura do sistema proposto.

7.1 Trabalho futuro

O trabalho desenvolvido, que conduziu à especificação e análise de desempenho da solução proposta, só poderá ser considerado concluído na altura em que se produzir um protótipo, susceptível de produção em série, para comercialização. Para tal, algumas das funções desenvolvidas para os sistemas de testes descritos podem ser reutilizadas numa implementação final.

Entretanto, e tendo em vista esse objectivo, será ainda necessário despender algum esforço no estudo e desenvolvimento da Aplicação de controlo, que permita controlar correctamente os fluxos de informação dos sensores para as entidades de controlo e destas para os actuadores.

O estudo dos atrasos máximos, introduzidos pela rede em função da distância entre os terminais interligados, que condicionam a utilização dos sistemas em aplicações que requerem baixos atrasos, poderá também ser efectuado futuramente.

Como ficou demonstrado, recorrendo à tecnologia ATM, é possível multiplexar eficazmente um número muito elevado de fontes de tráfego e estabelecer a interligação remota de sensores, actuadores e entidades de controlo, ou mesmo a interligação de diferentes redes industriais, e garantir a Qualidade de Serviço negociada no estabelecimento das ligações.

No entanto, apesar da solução proposta ter subjacente a tecnologia ATM, poderá ser igualmente avaliada a possibilidade de utilização de outras plataformas de comunicação tais como redes locais, redes móveis ou redes de satélite, capazes de transportar células ATM. Neste caso concreto, seria interessante estudar o impacto na Qualidade de Serviço efectivamente assegurada extremo-a-extremo, uma vez que os meios de comunicação e transmissão a utilizar poderão não suportar os níveis de Qualidade de Serviço equivalentes aos das redes ATM nativas.

Um outro cenário a explorar em trabalhos futuros é a da capacidade do sistema suportar a mobilidade de dispositivos associados a aplicações de controlo. Neste caso, será necessário

estudar a possibilidade de se usarem tecnologias de redes sem fios, como as descritas no capítulo 2, para suporte de ligações em que os dispositivos se movem, ou entre Adaptadores de terminal e Concentradores, ou mesmo entre estes e a rede fixa. Neste último caso, seria desejável explorar a interligação do sistema apresentado nesta tese com o apresentado em [Afo04].

Bibliografia

[Afo04] Afonso, J. A.; “Acesso Local sem Fios em Redes de Comunicação: Escalonamento de Tráfego de Tempo Real em Sistemas de Aquisição de Dados e Controlo”, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, 2004.

[Alm96] Almesberger, W.; “Linux ATM device driver interface Draft, version 0.1”, Laboratoire de Réseaux de Communication (LRC), EPFL, CH-1015 Lausanne, Suiça, Fevereiro de 1996.

[Alm97] Almesberger, W.; “ATM on Linux - The 3rd year”; Proceedings of 4th International Linux Kongress, Laboratoire de Réseaux de Communication at EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suíça, Março de 1997.

[Alm98] Almesberger, W., Boudec, J., Oechslin, P.; “Arequipa: Using TCP/IP over ATM with quality of service is simple... if you have ATM end-to-end”, Networking and Information Systems Journal, Volume 1, Number 4-5/1998, pp. 469--493. HERMES Science Publications, Paris, 1998.

[Alm02] Almeida, J. N.; “High-Speed Wireless Mobile LAN Communications: Improved Error Control Mechanisms for Real-Time Services”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Junho de 2002.

[Amo01] Amorim, D., Rochol, J., “Avaliação de Desempenho do Protocolo de Adaptação ATM tipo 2 (AAL-2)”, Proceedeings da XXVII Conferência Latino Americana de Informática - CLEI2001, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 2001.

[Ant00] Anthonis, J., Ramon, H., Bardemaeker, J.; “Implementation of an Active Horizontal Suspension on a Spray Boom”, Transactions of the ASAE, Vol. 43(2), pp:213-220, 2000.

[Ari02] Arioli machines for fabric finishing product catalog; http://www.arioli.biz; 2005.

[ATM94] ATM Forum, AF-UNI-0010.002, “User to Network Interface Specification - Version 3.1”, Setembro de 1994.

[ATM97] ATM Forum, AF-VTOA-0078.000, “ATM Circuit Emulation Service – Intereoperability Specification”, Version 2.0, Janeiro de 1997.

[ATM99a] ATM Forum, AF-VTOA-0113.000, ATM Trunking using AAL-2 for Narrowband Services, Fevereiro de 1999.

[ATM99b] ATM Forum, AF-TM-0121.000, “Traffic Management Specification Version 4.1”, Março de 1999.

[Aud05] Audon Electronics UK electronics and software design, http://www.audon.co.uk; 2005.

[Bea95] Beaulah, S., Zaid, S.; “Intelligent real-time fault diagnosis of greenhouse sensors”, IFAC Artificial Intelligence in Agriculture, Wageningen, pp.245-250, 1995.

[Bin00] Bing, B.; “High-Speed Wireless ATM and LANs”, Artech House, 2000.

[Bla95] Black, Uyless D., "ATM: Foundation for Broadband Networks", Prentice Hall Series in Advanced Communications Technologies, Maio de 1995.

[Blu03] Specification of Bluetooth System, Including Core V. 1.2, Novembro de 2003.

[Boe99] Boed, V., “Networking and Integration of Facilities Automation Systems”, Capítulo 8. CRC Press LLC, Setembro de 1999.

[Cab95] Cabral, J.M., “Emulação de Circuitos em Redes ATM, Sistema de Teste de Algoritmos de Recuperação de Relógio”, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Junho de 1995.

[Cab05] Cabral, J.M., Rocha, J.G., Neves, J.E., Ruela, J; “Adaptador de Terminal e Concentrador ATM, baseado num PC com Sistema Operativo Linux”, Publicação Privada Centro Algoritmi, Universidade do Minho, Março de 2005.

[Car86] Carlson, A.B.; “Communication Systems – An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication”, 3ª Edição; McGraw Hill, 1986.

[Cen97] Cena, G., Valenzano, A.; “An Improved CAN Fieldbus for Industrial Applications”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 44, No 4, Agosto de 1997.

[CiA95] CiA - CAN in Automation International Users and Manufacturers Group e.V., “CAN application layer (CAL)”, Working Group Higher Layer Protocols Draft Standard, CiA/DS205, CiA/DS207, Maio de 1997.

[Cou83] Coudreuse, J.P., “Les réseaux temporels asynchrones: du transfert de données à l’image animée”, L’Echo des Recherches, Nº 112, 1983.

[Cru02] Cruvinel, P., Minatel, R. “Image Processing in Automated Pattern Classification of Oranges”; Proceedings of the World congress of Computers in Agriculture and Natural Resources, Iguaçu Falls, Brazil, pp:56-61, 2002.

[Cun04] Cunha, J.B., "As novas tecnologias da informação e comunicação na indústria Agro-Pecuária"; 1º Congresso Luso-Brasileiro de Tecnologias de Informação e Comunicação na Agro-Pecuária, Junho, 2004.

[Dan92] Daniels, G.; "Overview of digital Mobile and Cordless Technologies", Telecommunications Magazine, Junho de 1992.

[Dem89] Demers, A., Keshav, S., Shenker, S.; “Design and Analysis of a Fair Queuing Algorithm.”, Proceedings of ACM SIGCOMM’89, Austin, Setembro de 1989.

[DIN91] DIN 19245, PROFIBUS – Process Field Bus Standard, Partes 1 e 2, Instituto Alemão de Normalização ,1991.

[Dix94] Dixon, R.; “Spread Spectrum Systems with Commercial Applications”, 3ª Edição, John Whiley & Sons, Nova Iorque, 1994.

[DS90] DS 21906, P-Net, multi-master, multi-net fieldbus for sensor, actuator and controller communications. Norma Dinamarquesa, 1990.

[Dur04] Durresi, A., Dash, D., Anderson, B.L., Kannana, R., Kota, S., Jain, R.; "Routing of Real-time Traffic in a Transformational Communications Architecture," Proc. of 2004 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, 7 a 12 de Março, 2004.

[EN96] EN 50170, General Purpose Field Communication System. EN 50170-1 (P-NET), EN 50170-2 (PROFIBUS), EN 50170-3 (WorldFIP). CENELEC, 1996.

[Ent97] Entacher, K.; "A collection of selected pseudorandom number generators with linear structures", Technical Report 97-1, ACPC -- Austrian Center for Parallel Computation, University of Vienna, Austria, 1997.

[Fyn94] Fynn, R., William L., Bauerle and Warren L; "Implementing a decision and expert system model for individual nutrient selection", Agricultural Systems, Vol. 44 (2), pp: 125-142, 1994.

[FOR99] "ForeRunner HE/200E/LE ATM Adapters for the PC User's Manual", Software Version 5.0.2, FORE Systems, Inc, Fevereiro, 1999.

[Fou] FOUNDATION™ Fieldbus Technical Specifications. Fieldbus Foundation, http://www.fieldbus.org.

[Fro04] Frost, A.R., French, A.P., Tillett, R.D.; "A vision guided robot for tracking a live, loosely constrained pig", Computers and Electronics in Agriculture 44, pp. 93–106, Elsevier, Março de 2004.

[Goy99] Goyal, R; "Traffic Management for TCP/IP over Asynchronous Transfer Mode (ATM) Networks", Tese de Doutoramento, The Ohio State University; EUA, 1999.

[Gra99] Granbohm, H.; Wilklund, J; "GPRS – General Packet Radio Service", Ericsson Review No. 2, 1999.

[Gre94] Greer, J., Sarah F., Greer, J., Murray, J.; "Explaining and Justifying Recommendations in an Agriculture Decision Support System", Computers and Electronics in Agricultural (11), pp 195-214, 1994.

[Hän94] Händel, R., Huber, M. N., Schröder, S.; "ATM Networks - Concepts, Protocols, Applications", Siemens AG, Munich, Addison-Wesley Publishing Company, 1994.

[Hon99] Honeywell Inc - Micro Switch Division, "SDS – Smart Distributed System - Application Layer Protocol - Version 2.0", GS 052 - Issue 4, USA, 1999.

[IEC93] IEC 61158-2 – Fieldbus Standard for use in industrial control systems, Part 2 Physical Layer Specification and Service definition, 1993.

[IEEE96] IEEE P1451.2 D2.01 IEEE Draft Standard for A Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators –Transducer to Microprocessor Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Agosto, 1996.

[IEEE99] IEEE Std 802.11, "Standard for Information Technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", Janeiro de 1999.

[IEEE04] IEEE, “IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee”, (http://www.ieee802.org), Setembro de 2004.

[ISO93] ISO 11898, “Road Vehicles - Interchange of Digital Information - Controller Area Network (CAN) for High-Speed Communication”, Novembro de1993.

[ISO95] ISO 11898, “Road Vehicles - Interchange of Digital Information - Controller Area Network (CAN) for High-Speed Communication – Amendement -1”, Abril de1995.

[ITU91a] ITU-T, Rec. G.703, “Physical/electrical characteristics of hierarchical digital interfaces”, Genebra, Abril, 1991.

[ITU91b] ITU-T, Rec. I.321 - “B-ISDN Protocol Reference Model and its Application”, Genebra, Abril de 1991.

[ITU92] ITU-T, Rec. G.728 – “Coding of Speech at 16 kbit/s using Low-Delay Code Exited Linear Prediction”, Setembro de 1992.

[ITU93a] ITU-T, Rec. I.320, “ISDN Protocol Reference Model”, Genebra, Novembro de 1993.

[ITU93b] ITU-T, Rec. I.327 - “B-ISDN Network Functional Architecture”, Rev. 1, Genebra, 1993.

[ITU93c] ITU-T, Rec. I.362 - “BISDN ATM Adaptation Layer (AAL) Functional Description”, Rev. 1, Genebra, 1993.

[ITU93d] ITU-T, Rec. I.363 - “BISDN ATM Adaptation Layer (AAL) Specification”, Helsínquia, Março de 1993.

[ITU93e] ITU-T, Rec. I.411, “ISDN User-Network Interfaces – Reference Configurations”, Rev. 1, Genebra, 1993.

[ITU94] ITU-T, Rec. Q.2110, “B-ISDN ATM Adaptation Layer – Service Specific Connection Oriented Protocol (SSCOP)”, Julho de 1994.

[ITU96] ITU-T, Rec. G.131, “Control of talker echo”, Agosto, 1996.

[ITU96a] ITU-T, Rec. G.729 – “Coding of Speech at 8kbit/s using Conjugate Structure Algebraic Coded Excited Linear Prediction (CS-ACELP)”, Março de 1996.

[ITU96b] ITU-T, Rec. I.363.1 – “B-ISDN ATM Adaptation Layer Specification: Type 1 AAL”, Agosto de 1996.

[ITU96c] ITU-T, Rec. I.363.3 – “B-ISDN ATM Adaptation Layer Specification: Type 3/4 AAL”, Agosto de 1996.

[ITU96d] ITU-T, Rec. I.363.5 – “B-ISDN ATM Adaptation Layer Specification: Type 5 AAL”, Agosto de 1996.

[ITU96e] ITU-T, Rec. I.371 – “Traffic control and congestion control in B-ISDN”, Agosto de 1996.

[ITU96f] ITU-T, Rec. I.356 – “B-ISDN ATM layer cell transfer performance”, Outubro de 1996.

[ITU97a] ITU-T, Rec. I.371.1 – “Traffic control and congestion control in B-ISDN: conformance definitions for ABT and ABR”, Junho de 1997.

[ITU97b] ITU-T, Rec. I.363.2 – “B-ISDN ATM Adaptation Layer Specification: Type 2 AAL”, Setembro de 1997.

[ITU98] ITU-T, Rec. I.366.1, “Segmentation and Reassembly Service Specific Convergence Sublayer for the AAL type 2”, Junho de 1998.

[ITU00] ITU-T, Rec. G.114, “One-way transmission time”, 18 Maio, 2000.

[Iye97] Iyer, J., Jain, R., Munir, S., Dixit, S.; "Performance of Compressed Voice Sources over VBR", ATM Forum/97-0608, Julho de 1997.

[Jam04] James, J.H., Chen, B., Garrinson, L.; “Implementing VoIP: A Voice Transmission Performance Progress Report”, IEEE Communications Magazine, pp 36-41, Julho de 2004.

[Jia04] Jiahua, W., Tillett, R., McFarlane, N.; “Extracting the three-dimensional shape of live pigs using stereo photogrammetry”, Computers and Electronics in Agriculture 44, pp. 203–222, Elsevier, Maio de 2004.

[Ker88] Kernighan, B., Ritchie, D.; “The C Programming Language”, Second Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.

[Kes97] Keshav, S.; “An Engineering Approach to Computer Networking”, pp. 209-246 Addison-Wesley, Janeiro de 1997.

[Lap95] Lapid, Y.; “Video Communications in B-ISDN”; Computer Networks Lab, Department of Electrical Engineering Technion, Israel, Fevereiro de 1995, http://www2.rad.com/networks/1994/atm/videoatm.htm.

[Lei02] Lei, T.; “Sensor-Based Precision Chemical Application Systems.”; Proceedings of the World congress of Computers in Agriculture and Natural Resources, Iguaçu Falls, pp:279-289, Brazil, 2002.

[Lew69] Lewis, P., Goodman, A. and Miler, A.; “A pseudo-random number generator for the System /360. IBM Syst. J., pp. 136-146, 1969.

[Liu99] Liu, C., Munir, S., Jain, R., Dixit, S.; "Packing Density of Voice Trunking using AAL-2", Proceedings IEEE Global Telecommunications Conference (GlobeCom99), Vol. 1(B), pp. 611-615, 5-9 de Dezembro, 1999, Rio de Janeiro, Brasil.

[Lue98] Luetchford, J.C., Schreinemachers, M., Arai, N.M.; “Applications of ATM In Global Networks”, IEEE Communications Magazine, pp 104-109, Agosto de 1998.

[Man03] Manfredi, P.F., Ratti, L., Speziali, V.; "The readout of the LHC beam luminosity monitor: Accurate shower energy measurements at a 40MHz repetition rate", Lawrence Berkeley National Laboratory. Paper LBNL-52654, http://repositories.cdlib.org/lbnl/LBNL-52654; Maio, 2003.

[Mar97] Martins, J.A.L., “Evolução Tecnológica da Internet em Portugal”, Ingenium, 2ª Série, Nº 17, pp 70-78, Maio de 1997.

[McC93] McClure, J., Tomasko, M., Collison, C.; “BEE AWARE, an expert system for honey bee diseases, parasites, pests and predators”, Computers and electronics in agriculture, vol.9, pp111-112, 1993.

[McD95] McDysan, D. E., Spohn, D. L., “ATM Theory and Application”, McGraw-Hill Series on Computer Communications, 1995.

[Mcl97] Mcloughlin, M., O'Neil, J.; A Management Briefing on Adapting Voice for ATM Networks, An AAL-2 Tutorial. General DataComm, 1997.

[Meg02] Megerian, S., Koushanfar, F., Qu, G., Veltri, G., Potkonjak, M.; “Exposure in wireless sensor networks: theory and practical solutions”, Wireless Networks, Kluwer Academic Publishers, ISSN 1022-0038, vol. 8, no. 5, pp 443-454, 2002.

[Moo98] Moondhra, V., “Implementation And Performance Analysis of ATM Adaptation Layer Type 2”, Tese de Mestrado, Department of Electrical Engineering and Computer Science and the Faculty of the Graduate School of the University of Kansas, EUA, Maio, 1998.

[Mor00] Morimoto T., Hashimoto, Y.; "AI approaches to identification and control of total plant production systems", Control Eng. Practice, Vol. 8 (5), pp. 555-567, 2000.

[Mur01] Muratore, "UMTS Mobile Communications for the future", J. Wiley, 2001.

[Nev95] Neves, J.J.S.E.; "Partilha Dinâmica de Recursos em Redes de Comunicação", Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1995.

[Nev99] Neves, J.J.S.E.; "Modular Architecture for High Flexibility ATM Based Control System", Asia-Pacific Conference on Communications, APCC'99, Beijing, China, Outubro de 1999.

[NF89] NF C46. FIP Bus for Exchange of Information Between Transmitters, Actuators and Programmable Controllers. Norma Francesa, 1989.

[Nun92] Nunes, M. S., Casaca, A.; "Redes Digitais com Integração de Serviços", Editorial Presença, 1991.

[Omi93] Omidyar, C.G., Aldridge, A.; "Introduction to SDH/SONET", IEEE Communications Magazine, Setembro de 1993.

[Orz98] Orzessek, M., Sommer, P.; "ATM & MPEG-2, Integrated Digital Video into Broadband Networks", Hewlett - Packard Company, Prentice - Hall, Inc., 1998.

[Owe94] Owen, F.F.E., "PCM and Digital Transmission Systems", Texas Instruments Electronics Series, McGraw-Hill Book Company, 1982.

[Pal99] Palminha, C., Alves, F., Duarte, L., Rocha, R., Gerald, J.; "Redes de Comunicação ATM sem Fios sobre 802.11", EPCM'99 - Encontro Português de Computação Móvel, Tomar, PORTUGAL, Novembro de 1999.

[Par94] Parekh, A., Gallager, R.; "A Generalized Processor Sharing Approach to Flow Control in Integrated Services Networks – The Multiple Node Case.", IEEE/ACM Transactions on Networking, pp. 137-150, Abril 1994.

[Pee96] Pee, V., Berckmans, D.; "Quality of modeling plant responses for environment control purposes. Information and communication technology applications in agriculture: state of the art and future perspectives.", Proceedings of the Congress on ICT applications in Agriculture, pp. 359-367, 1996.

[Per03] Pereira, M.R., Amorim, C.L., Castro, M.C.; “Tutorial sobre Redes de Sensores”, Cadernos do IME (Instituto de Matemática e Estatística), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Série Informática: 14, Junho de 2003.

[Pim90] Pimentel, J., “Communication Networks for Manufacturing”, Prentice-Hall International Editions, Englewood Cliffs, New Jersey, 1990.

[Pix02] Pixord 100/120 Network Camera User’s Manual, PIXORD Corporation, Rev. 1.0, Software Version 1.14, Janeiro de 2002.

[PRO94] PROFIBUS Nutzerorganisation e.V., Haid-und-Neu-Str. 7., Implementation Guide to DIN 19245 Part 1, Karlsruhe, Alemanha, Agosto de 1994.

[Pre92] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., Flannery, B. P.; “Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing”, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, 1992.

[Pry95] Prycker, M., “Asynchronous Transfer Mode - Solution for Broadband ISDN”, Prentice Hall, 3ª Edição, 1995.

[Qua92] Qualcomm Incorporated, "Introduction to CDMA and the Proposed common Air Interface Specification (CAI) for a Spread Spectrum Digital Cellular Standard: An Overview of the Application of Code Division Multiple Access (CDMA) to Digital Cellular Systems and Personal Cellular Networks”, Telecommunications Industry Association (TIA) – TR.45.5 Subcommittee, EUA, Maio de 1992.

[Roc98] Rockwell Automation Publication, “DeviceNet Product Overview”, DN-2.5, Fevereiro de 1998.

[Ruf97] Rufino, J., “An Overview of the Controller Area Network”, Proceedings of the CiA Forum - CAN for Newcomers, CiA, Braga, Portugal, Janeiro 1997.

[Set93] Manual da função *Setitimer*, de acordo com os standards SVr4 e 4.4BSD, Linux 0.99.11, 1993.

[Sha00] Shah, N., Sawkar, A., Marinho, J.; “Wireless Data Networking, Standards and Applications”, Bell Labs Technical Journal, pp. 130-149, Março de 2000.

[Shi96] Shimizu, H., Yamazaki, M.; “Generalized system for plant growth analysis using infrared LED. Plant production in closed ecosystems: automation, culture and environment.”, Acta Horticulturae 440, pp:446-451, 1996.

[Sil97] Silva, C., “Especificação e Desenvolvimento de um Protocolo de Comando e Controlo para Aplicações Multimédia Interactivas”, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1997.

[Spu00] Spurgeon, C. “Ethernet, the definitive guide”, Sebastopol: O’reilly, Fevereiro de 2000.

[Ste03] Stein, Y., Stroehlein, B.; “Taking an Inside Look at TDMoIP: A Tutorial”, CommsDesign.com, Março de 2003.

[Tov99] Tovar, E.M.M., “Supporting Real - Time Communications with Standard Factory - Floor Networks”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Julho de 1999.

[Tur83] Turner, J.S., Wyatt L.F.; “A packet network architecture for Integrated Services”, Globecom ‘83, San Diego, Novembro de 1983.

[Ver97] Veríssimo, P., Rufino, J., Ming, L.; “How hard real-time communication on field-buses?”, Digest of Papers of the 27th IEEE International Symposium on Fault-Tolerant Computing Systems. Seatle, Washington, USA, Julho de 1997.

[Wal99] Walke, B. “Mobile Radio Networks – Networking and Protocols”, J. Wiley, 1999.

[Wil02] Willig, A., “Investigations on MAC and Link Layer for a wireless PROFIBUS over IEEE 802.11”, Tese de Doutoramento, Technical University of Berlin, School of Electrical Engineering and Computer Sciences, Maio de 2002.

[Win98] Winstanley, S. B., “Quality of Service over ATM Networks”, Tese de Doutoramento; Department of Electronic Engineering, Queen Mary and Westfield College, University of London, 1998.